

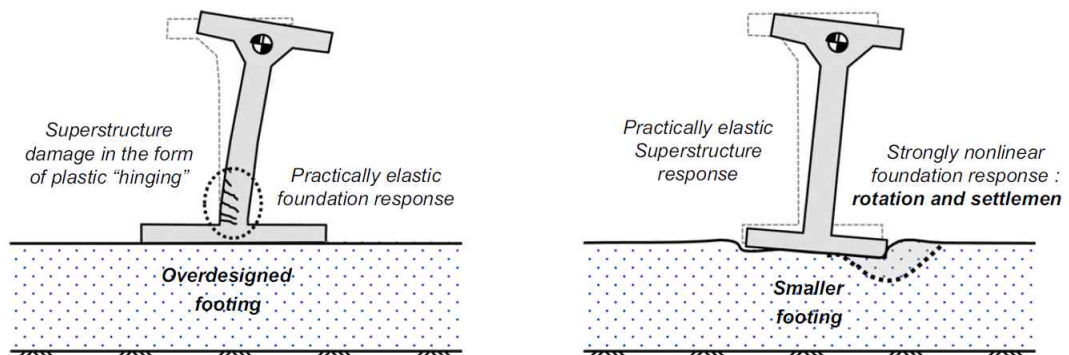
제1장 연구개발과제 개요

1절 연구개발의 목적 및 필요성

사회 기반 시설은 국민들의 안정적인 삶에 매우 중요한 구조물들로 높은 안정성이 요구되며, 근래에 들어 지진의 발생빈도가 높아짐에 따라 안정적인 내진설계가 매우 중요하다. 그 중 기초와 같이 지진 시 구조물의 관성력이 지반에 영향을 미칠 수 있는 경우, 구조물은 지반과 독립적으로 거동하지 않고, 상호간 복잡한 응답 현상을 보인다. 이와 같은 거동 특성을 좀 더 사실적이고 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)을 반영해야 한다. 현재, 지반-구조물 상호작용을 반영한 구조물 지진 응답 특성 및 설계 지진하중을 결정하는 과정은 수치 해석적 방법을 통하여 제한적으로 수행되고 있으며, 현재까지 개발된 SSI용 수치해석 프로그램들은 대부분 구조물을 중심으로 개발되어 주파수 영역에서 선형 또는 등가선형 해석을 실시하고 있기 때문에 비선형적 특성이 강한 지반재료의 거동을 신뢰성 있게 반영하지 못하고 있다.

현행 내진 설계기준에서는 하부 기초의 안전율을 크게 고려하여 기초의 하부지반이 아닌 상부 구조물에서 지진 하중을 저항하도록 하여 구조물에서 항복이 발생하도록 유도하고 있다[그림 1]. 이러한 현행 설계 기법은 하부 기초를 필요 이상으로 과다 설계하고 있으며 하부 지반에서 전달되어 오는 지진 에너지를 감쇠 없이 그대로 상부 구조물에 전달하게 되므로 상부 구조물 또한 과다 설계하고 있는 실정이다. 따라서 기초 지반의 항복(yielding) 현상을 실험적으로 검증 및 분석하여 그 결과를 바탕으로 현행 내진 설계 기준을 개선하고 새로운 기초 형식을 개발하여 경제적이고 안전한 설계 기술을 정립할 필요가 있다.

기초의 항복 거동을 이용하는 회전 기초(Rocking Foundation)개념은 현행 내진설계 기준이 가지고 있는 기초 및 상부 구조물의 막대한 건설비용과 예측 불가능한 대형 지진에 대한 안정성 확보 등 다양한 현행 설계의 문제를 해결할 수 있는 획기적인 설계 개념으로 선도적 연구를 통해서 그 효과가 증명되어 오고 있다[그림 1]. 그러나, 기초의 축소 설계 시 유발 될 수 있는 정적 안정성 부족 및 지진 시 발생하는 기초 침하 및 수평 변위, 그리고 지진 후 보강 기법 등에서 해결해야 할 부분들이 남아 있어 실제 시공에 활용되기에는 다소 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 수치해석은 물론 실험적 검증을 바탕으로 설계법 정립 및 검증이 반드시 수반되어야 한다.



(a). 얇은 기초의 현행 내진설계 개념
그림 1. 얇은 기초의 현행 내진설계와 회전 기초의 개념 (Anastasopoulos 등, 2012)

한편 지진 시 지반은 구조물과 달리 3차원 무한성, 불균질 특성, 응력 조건에 따른 강성 및 에너지 소산 변화, 변형률에 따른 비선형 거동 특성 등이 다양하게 나타나기 때문에 이를 반영한 정확한 수치해석이 매우 어려운 실정이다. 지진 시 지반-기초-구조물의 거동을 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 지반구조물의 주 재료인 흙이 갖는 불확실성 및 공학적 특성상, 수치모델링과 함께 물리적 모델링(Physical Modelling)을 통한 실험적 검증이 병행되어야 하나, 국내 물리적 모델링 기법의 기술적 한계로 인하여 주로 수치모델링 및 1g 축소모형실험이 제한적으로 수행되어 왔다.

이와 비교하여 원심모형시험은 축소된 모형을 고속으로 회전시켜 실제 중력보다 매우 큰 가속도($N-g$)를 인위적으로 적용함으로써 현장의 실 응력상태를 구현할 수 있고, 대형 지반 구조물의 설계와 시공 사이에 발생할 수 있는 지반 거동의 괴리를 해소함과 동시에 다양한 변수를 고려하여 신뢰성 있게 현장을 재현할 수 있는 장점이 있다. 특히, 수치해석이나 현장 구조물의 거동에서는 구현이 불가능한 극한상태의 파괴 특성까지도 눈으로 직접 확인할 수 있으므로, 지반 조건 및 지반-구조물 상호작용에 의한 복잡한 거동 메커니즘을 직접적으로 규명하기에 적합한 수단이다[그림 2].



그림 2. 원심모형실험의 장점 및 활용성

이에 본 연구에서는 국토교통부의 분산공유형 건설 연구 인프라 구축 사업(KOCED Program)에 의하여 국내에 구축된 원심모형실험을 활용하여 항복 거동을 이용하는 기초-지반-구조물 시스템의 에너지 소산 메커니즘 및 허용 침하량을 평가하고, 이를 바탕으로 현행 설계 기준의 문제점을 보완할 수 있도록 항복 거동을 이용하는 신개념 기초 형태를 제안 및 검증하는 것을 최종 목표로 한다.

2절 연구개발의 정의, 범위

가. 연구개발의 정의

기초는 교량, 아파트 등 다양한 토목 및 건축 구조물의 지지력 향상 등을 위해서 이용되는 대표적인 지반 구조물로 우리 생활과 밀접하게 연결 되어 있어 기초의 정적 및 동적 안정성을 확보하는 것은 매우 중요하다. 또한, 기초의 파괴는 그 자체의 파괴에만 국한되지 않고 상부 구조물의 붕괴로 이어진다는 점에서 기초의 안정성은 엄밀히 검토되어 설계에 이용될 필요가 있다. 1994년 California에서 발생한 Northridge 지진이나 1995년 일본 고베 지방에서 발생한 지진 시 말뚝 기초로 지지된 많은 구조물들이 파괴되었으며, 이러한 구조물들이 대부분 Life line 구조물로서 교통망 붕괴 및 막대한 인적, 경제적 손실을 야기한 바 있다.

현행 내진설계 기준에서는 하부 기초의 정적, 동적 안전율을 크게 산정하여 기초의 움직임과 파괴를 최소화 하도록 설계하고 있다. 이는 지진 시, 상부구조물에서 지진 에너지를 소산 시키고 저항하도록 하여 상부 구조물 기둥에서 파괴가 발생하도록 유도하게 된다. 이러한 현행 설계 기법은 땅속에 묻혀있는 기초에서 파괴가 유발 되지 않기 때문에 지진 시 구조물의 기능 복구에 유리한 장점이 있다. 그러나 이 경우 기초를 필요 이상으로 과다 설계 하고 있으며, 기초가 강하게 건설 될 경우 하부 기반암에서 전달되어 오는 지진 에너지를 감쇠 없이 그대로 상부 구조물에 전달하게 되므로 상부 구조물 역시 큰 안전율로 설계함에 따라 내진설계 비용이 과다하게 산정되고 있는 실정이다

또한, 연약한 지반에 구조물 건설 시, 안정성 높은 기초의 설계를 위해서 현행 내진설계 기준에서는 얇은 기초, 말뚝 기초, 깊은 지하층과 같은 다양한 기초 형식 중 말뚝 기초를 주로 사용하고 있다. 강관 말뚝 및 현장 타설 말뚝의 경우 하부 기반암에 말뚝을 고정하는 선단지지 기법이 사용되는데, 이때 깊은 깊이의 기반암까지 다수의 선단 말뚝을 설치하게 되어 기초 공사 비용이 과다하게 발생한다. 또한 말뚝 기초의 경우 말뚝 시스템의 공진 및 운동학적 힘에 의한 말뚝 상단부의 지진 하중 증가로 인해서 상부 구조물의 지진하중이 고정단의 경우보다 과다하게 발생 할 수 있다

한편, 국내 지반은 대부분 풍화토, 풍화암 지반으로 토목, 건축의 기초 설계를 하기에 매우 양질의 지반층이다. 그러나 현행 설계에서는 기초의 보강을 위해서 연암까지 현장 타설 말뚝을 설치하고 있어 기초 시스템 공사에 많은 자원이 소모되며, 상부 구조물 지진 하중이 크게 유발되어 상부 구조물이 과다하게 설계되는 문제점이 있다.

따라서 본 연구과제에서는 기초 시스템의 회전 거동 및 항복거동을 정적 및 동적 원심 모형실험을 통해서 평가하여, 기초의 항복거동을 이용한 신개념 기초 내진 설계 공법을 개발 및 검증하고자 한다[그림 3].

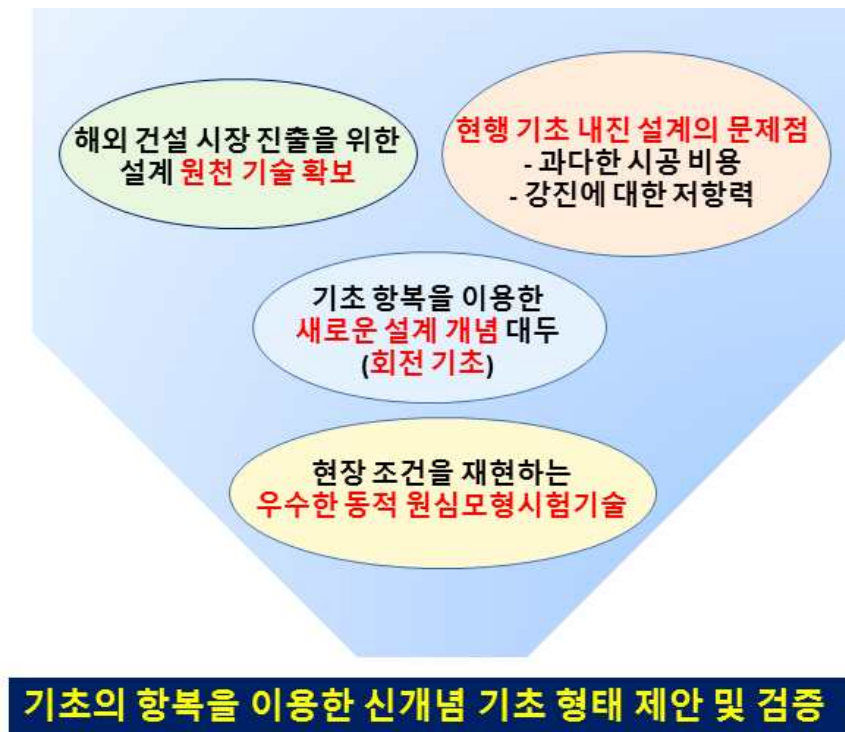


그림 3. 연구개발의 정의

나. 연구개발의 범위

본 연구과제에서는 항복거동을 이용한 기초 설계와 관련하여 국내외 연구 동향을 조사하고, 원심모형실험을 통해서 기초의 항복거동 메커니즘을 규명하였다. 이를 바탕으로 항복거동을 이용할 수 있는 다양한 기초 시스템의 거동을 평가하고, 신개념 기초 내진 설계 형태를 제안 및 검증하는데 연구 목적이 있다.

본 연구과제에서 수행한 기초 시스템의 항복거동 평가 및 신개념 기초 설계 형태를 제안 및 검증의 연구 범위는 다음과 같다.

- (1) 연구동향 조사 및 원심모형실험 기법 구축
- (2) 기초 하부지반 항복거동 및 에너지소산 메커니즘 규명
- (3) 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 시 거동 특성 및 적용성 평가
- (4) 풍화토 지반에서의 기초 하부지반 항복 거동 특성 및 적용성 평가
- (5) 항복거동을 이용하는 신개념 기초 설계 형태 제안 및 검증

3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 국내 기술 및 산업 동향

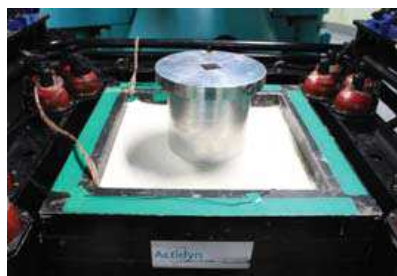
가. 원심모형실험기

- 국내 원심모형시험 시설은 90년대 중반 이후 기업체 및 대학을 중심으로 도입되기 시작하여, 압밀, 굴착, 연약지반, 기초거동, 사면, 댐 등 다양한 지반 구조물에 적용되어 왔음.
- 현재 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터를 포함하여 K-water 연구소, 대우건설기술 연구소, 강원대학교, 충북대학교에서 총 4기의 원심모형시험 시설이 운영 중에 있음.
- 본 연구에서는 KOCED 사업의 일환으로 KAIST 지오센트리퓨지 센터에 도입되어 운영 중인 원심모형실험 시설을 이용하였으며, 본 시설은 Ng의 원심 가속도로 회전하는 중에 지진 모사가 가능한 진동대를 동시에 보유하고 있어 지반 구조물의 내진 성능평가 관련 연구를 수행할 수 있는 실험 시설임.
- KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 원심모형시험기는 프랑스 ACTIDYN SYSTEMES SA의 C72-2 모델로 Beam 형태, 회전반경 5m, 최대 용량 240g-tons의 규모를 갖는다. 최대 2,400kg의 지반모형을 적재한 상태에서 100g의 원심가속도까지 구동이 가능하며, 1,300kg 적재하중에서 130g의 최대 원심가속도를 구현 가능함.
- 본 연구에 사용된 KOCED 진동대는 전기제어-유압방식의 진동대로서, 앞서 설명한 회전 반경 5.0 m, 최대 240 g-ton 용량의 원심모형시험기에 설치되어 원심모형시험 중 복합 지진운동의 모사가 가능함. 적재하중이 없을 경우에는 최대 40g, 최대 적재하중 700 kg에 대해서는 최대 20g의 진동 가속도를 재현할 수 있고, 이는 최대 0.5g의 강진을 모사할 수 있는 가속도 수준임.

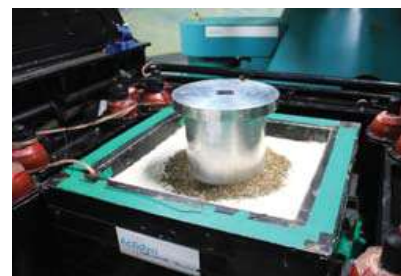
나. 기초 내진설계 분야 국내 기술 동향

(1) 원전 기초지반 및 격납건물의 설계 지진하중 산정을 위한 동적 원심모형시험 기술(2010~2012)

풍화토, 풍화암, 사질토 지반과 격납 구조물에 대한 축소 모델링을 수행하고 동적 원심 모형수행시 In-flight test와 실내 시험을 활용하여 그 특성을 확인하였음. 그리고 다양한 특성의 지진을 세기를 단계적으로 증가시키며 적용하여 지반과 구조물의 지진 시 응답을 관찰 하였음. 이를 통해서 다양한 지반 조건에 따른 Site-specific한 원전 격납 구조물의 지반-구조물 상호작용을 분석하였음.



사질토 지반 실험

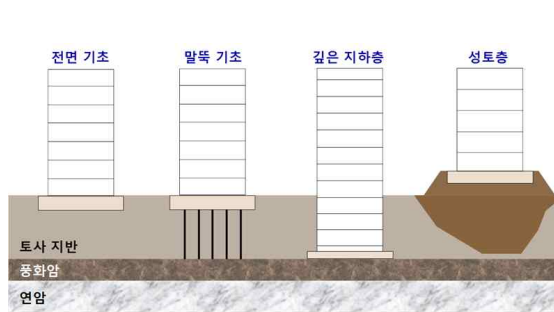


풍화토 지반(뒷채움 유) 실험

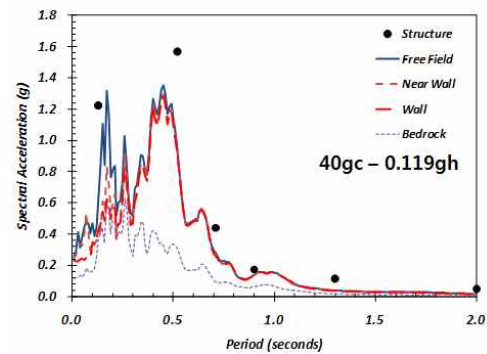
그림 4. 원심모형실험을 이용한 원전 구조물의 지진하중 산정 평가

(2) 국내 지반환경 및 지하층구조를 고려한 건축물의 지진하중의 평가 (2008~2011)

국내 지반환경(연약 지반의 깊이, 구성) 및 지하 구조물의 특성(지하층의 깊이, 규모)에 적합한 건축물의 지진하중을 평가하기 위해서 다양한 수치해석 및 동적 원심모형실험을 수행하였음. 실험 결과와 함께 다양한 지반 응답 해석을 통해 국내 지반 환경에 적합한 지반 증폭 계수를 산정하여 미국 UBC 97기준을 준용한 국내 설계 응답 스펙트럼의 문제점과 개선방안을 제시하였음. 또한 연약한 지반위에 놓여져 있는 얇은 기초와 다양한 강성을 지니고 있는 지하층의 지반-구조물 상호작용 효과를 반영하는 상부 단자유도 구조물의 지진하중을 평가하였음. 상부 구조물의 지진 하중은 기초의 형태에 따라서 실제 자유장 지표면 응답을 바탕으로 설계되는 현행 설계 기준의 지진 하중과 상이한 현상을 관찰하였음



(a) 다양한 기초 형식

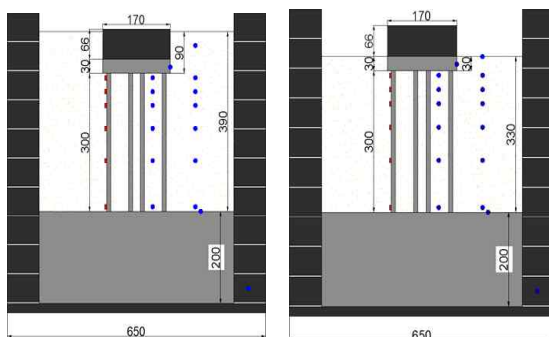


(b) 대표적 실험 결과 (지진하중 비교)

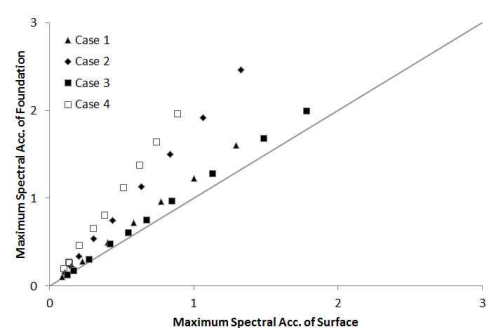
그림 5. 다양한 기초 위에 놓여진 상부 구조물의 지진하중 응답 평가

(3) 말뚝기초 건축물에서 지진하중 저감효과 평가를 위한 동적원심모형실험 (2012-2013)

말뚝 기초의 경우 현행 설계 기준에서는 지반과 말뚝의 상호작용을 스프링으로 환원하여 해석 후 설계를 수행함. 국내 임대아파트의 대표적인 비정형 군말뚝 시스템에 대한 동적 원심모형실험을 다양하게 수행하였음. 이를 통하여 기초판이 지반에 매설될 경우 지반에서 작용하는 운동학적 힘과 말뚝 시스템의 고유주기 공진으로 인하여 상부 구조물의 지진하중이 크게 발현될 수 있는 가능성을 확인하였음.



(a) 말뚝 기초 판 묻힘 깊이 변화

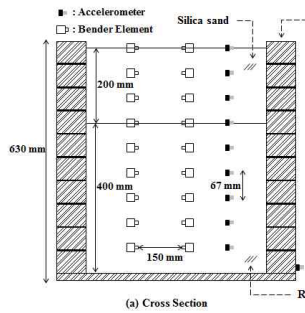


(b) 지표면과 기초판의 장주기 영역 지진하중 비교

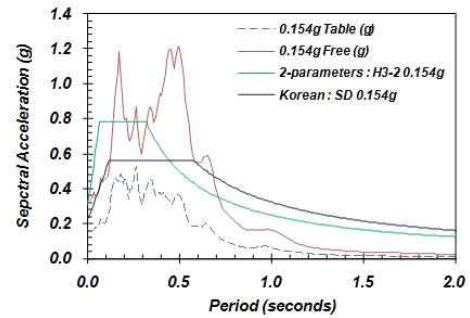
그림 6. 지반-말뚝 상호작용 효과에 의한 지진하중 증가 결과

(4) 지진가속도 분석등을 통한 설계지반운동 표시방법 고도화기술 개발 (2013~2016)

국내 지반조사 자료를 활용하여 지반증폭계수를 산정 및 분석한 후 지반응답해석을 수행하여 현행 내진설계기준 방법과 2-매개변수 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼 작성방법을 비교하였으며 적분구간 변경 등을 통하여 국내 지반에 적합한 지반증폭계수 개선방안을 제시하였음. 또한, 동적원심모형실험을 이용하여 제안된 지반분류체계 및 설계응답스펙트럼을 실험적으로 검증하였음.



지반증폭 원심모형실험 단면



응답스펙트럼 비교 분석

그림 7. 원심모형실험을 이용한 자유장 지반응답평가

(5) 동적 원심모형실험을 이용한 기초-지반 시스템 및 토류구조물 지진하중 평가 (2012~2015)

얇은 기초 위에 놓인 단자 유도 구조물의 지진하중과 지반-기초 구조물 상호작용을 원심모형실험을 수행하여 평가하였음. 이를 통해서 얇은 기초가 연약한 지반위에 설치되어 있을 경우 상부 구조물의 지진하중이 현행 설계 기준에 비해 현격히 감소하는 현상을 확인하였음. 이는 새로운 기초 내진설계인 회전 기초 개념의 가능성을 확인하고 이에 대한 세계적 수준의 평가 기술 보유가 필요함을 보여 주었음.

- (a) 현행 설계 개념(Fixed)과 회전 기초 설계 개념(Flexible) 지진 하중 비교 (b) 회전 기초 개념으로 제작된 모형 기초에서의 지진 에너지 감쇠 효과

그림 8. 새로운 회전 기초 설계 개념에 대한 평가

2. 국외 기술 및 산업 동향

가. 원심모형실험기

- 국제적으로 미국, 일본, 프랑스, 네덜란드 등에서는 국책 연구소를 중심으로 원심모형 시험 기술을 개발, 선도하고 있으며, 대학의 경우 국가주도의 대형 연구단 과제 (NEES, NECER)를 통하여 신기술을 개발하고 있음.
- 지진 등 진동 관련 자연 재해를 모사하는 방재 기술 분야에서는 그동안 강력한 도구로서 사용되어온 수치 모델링 기법의 발전이 한계에 부딪히면서 실물 크기의 물리적 모델링이 가능한 대규모 진동대 실험시설 및 동적 원심모형시험 시설의 구축이 증가.
- 동적 원심모형시험이 가능한 국책 연구소 및 대학으로는 미국 Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), UC Davis, 홍콩과기대(HKUST), 프랑스 LCPC 등이 있음.



(a) RPI (미국)



(b) UC DAVIS (미국)

그림 9. 국외 대표 동적 원심모형시험 시설

표1. 진동대를 포함한 동적 원심모형시험 시설을 보유한 대표적 국외 기관 현황

기관	국가	구분	선도 기술
Cambridge	영국	대학	- 원심모형시험 및 해석 기술 개발, 이미지프로세싱 기술
LCPC	프랑스	연구소	- 4자유도 로봇 등 부대장비 개발
RPI	미국	대학	- 센서, Visualization, Network 활용 - 지진 액상화에 대한 말뚝기초 거동
UC Davis	미국	대학	- 센서, Visualization, Network 활용 - 지반 구조물 및 기초 지진응답특성 평가
C-Core	캐나다	연구소	- 해양 기초

나. 동적원심모형시험을 활용한 기초 내진 설계 기법 연구

(1) 원심모형실험을 이용한 설계법 검증 (Rion-Antirion 교량)

그리스 아테네 서쪽으로 250km 떨어진 지점에 위치한 Rion-Antirion 교량은 코린스 해협을 가로지르며 그리스 본토와 펠로폰네소스 반도를 잇는 세계 최장 사장교로서 2004년 아테네 올림픽과 동시에 개통하여 성화가 지나간 곳으로 더욱 유명함. 본 교량은 1880년에도 제안되었으나 본 지역의 암반이 해협 밑 토양 깊은 곳에 자리하고 있었고, 리히터 규모6의 강진이 지난 40년동안 7번이나 발생하여 여러 가지 내진공법이 요구되었기에 1 세기나 지난 1998년 공사가 시작되었음. 연약지반과 내진에 대한 교량 기초부의 해석 및 설계에 원심모형실험이 적극 적용되었음.



(a) 원심모형실험을 이용한



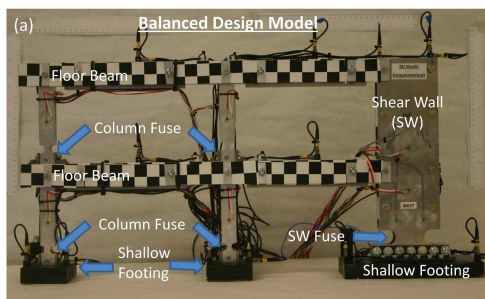
(b) Rion-Antirion Bridge

Rion-Antirion Bridge 기초 내진 설계

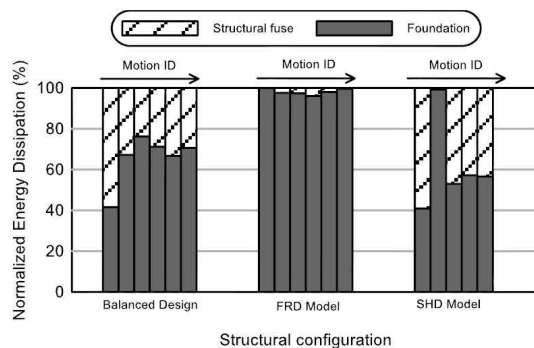
그림 10. 원심모형실험을 이용한 설계법 검증 (Rion-Antirion 교량)

(2) 원심모형실험을 이용한 얇은기초 시스템 지진 거동 평가

Liu et al.(2013)의 경우 3차원 비탄성 골조 구조물과 2차원 복합 구조물을 얇은 기초 위에 설치하여 원심모형실험을 수행하였음. 이를 통해서 현행 설계 기법과 회전 기초의 설계 기법 그리고 복합적 설계 기법을 비교하여 지진 시 에너지 감쇠 분포 및 소산 메커니즘을 확인하였음.



(a) 얇은 기초 위 2차원 골조
구조물



(b) 기초 및 구조물 형태에 따른 지진
에너지 소산 비율 비교

그림 11. 회전 기초의 에너지 소산을 평가 실험 (Liu et al., 2013)

(3) 기초 회전거동 평가에 대한 실험적 연구 사례

전 세계적으로 기초의 회전거동에 대한 연구가 이루어진 사례는 [표 2]와 같음. 미국, 일본, 유럽 등 선진국들의 기술 선점을 위한 노력이 활발히 이루어지고 있으며, 본 과업을 통해서 국내에서도 이에 대한 기술 수준 향상을 목표로 하였음.

표 2. 모형실험 실험 사례 (Pecker 등, 2014)

모형 실험 종류	대상 구조물	구조물 거동	지반 조건	수행 기관	참고 문헌
1g 진동대	CAMUSIV RC frame	Non-linear	Dry sand Dr 71%	CEA, Saclay, France	Combescure and Chaudat (2000)
원심모형실험	Bridge pier	Linear- elastic	Dry sand Dr 80%	UC Davis, USA	Ugalde et al. (2007)
1g 진동대	Steel rack	Rigid	Dry sand Dr 80%	PWRI,Tsukuba, Japan	Shirato et al. (2008)
원심모형실험	SDOF column	Linear- elastic	Dry sand Dr 38%	UC Davis, USA	Deng et al. (2012)
원심모형실험	2-story frame building with structural fuses	Non-linear	Overconsolidated clay	UC Davis, USA	Liu et al. (2012)
1g 진동대	Bridge pier	Linear- elastic	Dry sand Dr 85%	NTUA, Athens, Greece	Drosos et al. (2012)
원심모형실험	SDOF column	Linear- elastic	Submerged dense sand on liquefiable sand layer Dr 68%	UC Davis, USA	Allmond et al. (2011)
원심모형실험	SDOF column	Linear- elastic	Dry sand Dr 51 and 85%	U. ambridge, UK/IFSTTAR, Nantes,France	Heron et al. (2012)
원심모형실험	SDOF column	Linear- elastic	Dryy sand and 81%	SNU, KAIST Korea	Kime et al. (2014)

4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

본 연구에서는 원심모형실험을 이용하여 기초 하부지반 항복거동 및 에너지 소산 메커니즘을 규명하고, 이를 바탕으로 항복거동을 이용한 신개념 기초 설계 형태를 제안 및 검증하는 것을 목표로 하고 있다. 과업기간 중 수행된 연구개발결과를 요약하면 다음과 같다.

- 원심모형실험을 이용한 기초 항복거동 및 에너지소산 메커니즘 규명
 - 수평 반복하중 실험을 통한 얇은기초 시스템의 항복거동 평가
 - 지진 시, 얇은기초 시스템의 항복거동 및 구조물 지진하중 평가
 - 기초 하부지반 원형현상에 따른 항복거동 및 에너지 소산 메커니즘 분석
- 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 시 거동 특성 및 적용성 평가
 - 말뚝이 지지층에 근입되었을 때, 말뚝 기초판 결합에 따른 지진 시 거동 평가
 - 말뚝이 지지층에 근입되지 않았을 때, 말뚝 기초판 결합에 따른 지진 시 거동 평가
 - 상부 구조물 지진하중과 시스템 수직침하에서 항복거동을 반영할 수 있는 비결합 말뚝 시스템의 우수성 검증
- 풍화토 지반에서의 기초 하부지반 항복 거동 특성 및 적용성 평가
 - 풍화토 지반에 놓인 얇은 기초 시스템의 지진 시 거동 평가
 - 풍화토 지반에서 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 시스템의 지진 시 거동 평가
 - 풍화토 지반에서도 항복거동이 발생되어 상부 구조물 지진하중을 제한되며, 지진 시 상대적으로 적은 침하량이 발생함을 검증
- 항복거동을 이용하는 신개념 기초 설계 형태 제안 및 검증
 - 항복거동을 이용한 신개념 기초 설계 형태 개발
 - 수평 반복하중 실험을 통한 다양한 기초 시스템의 항복거동 평가
 - 지진 시, 다양한 기초 상부 구조물의 지진 하중 및 시스템 침하 평가
 - 하부지지 패드와 전면기초가 분리된 말굽형 기초의 항복거동 검증

현재 국·내외 연구기관의 유사연구개발 결과와 비교 시 본 연구과제의 우수성 및 창의성은 다음과 같다.

- 기초 시스템 항복거동 평가를 위한 원심모형실험 절차 수립 및 검증
 - 기초 항복거동 평가를 위한 원심모형실험 절차를 수립 및 검증하여, 내진 설계법 개발 및 검증을 위한 원심모형실험 기법의 국산화
- 복잡한 기초 시스템 항복거동 메커니즘 규명을 통한 내진설계 기술력 증가
 - 기초 항복거동 메커니즘을 규명하여 다양한 형태의 활용방안 제시
 - 풍화토 지반에서 항복거동의 적용성, 비결합 말뚝기초 시스템의 우수성 등을 실험적으로 검증하여 내진설계 기술력 확보
- 다양한 기초 시스템의 수평반복하중 및 지진하중에 따른 거동 D/B 구축
 - 얇은기초, 말뚝기초, 말굽형 기초 등 다양한 기초 시스템의 거동에 대한 D/B를 구축하여 향후 수치해석 검증 및 설계기준 검증을 위한 보완 자료로 활용 가능
- 항복거동을 이용하는 신개념 기초 설계 형태 제안 및 검증
 - 기초 하부지반의 항복거동을 이용하여 지진 시 상부 구조물의 지진하중을 줄이고, 기초 시스템의 침하량을 허용 범위내로 제한 할 수 있는 경제적이고 안전한 기초 설계 형태 제안 및 검증

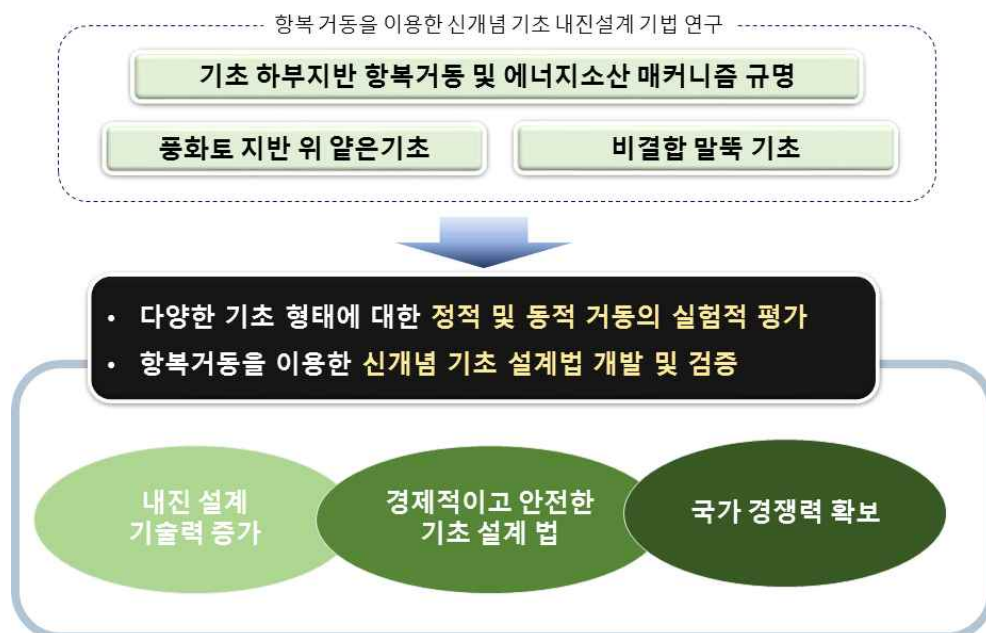


그림 12. 연구개발결과의 우수성 및 창의성

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

1절 연구수행 전략 및 방법론

1. 원심모형시험

기초 구조물을 포함한 주변 지반, 댐, 제방, 해안 방파제와 같은 지반 구조물의 안정성 검토는 보편적으로 이론적 방법, 수치 모델링, 모형을 통한 시험 방법이 사용된다. 이 중, 시험을 통한 대표적인 방법에는 축소모형시험, 원심모형시험, 실험형시험 등이 있다. 실험형 시험의 경우, 결과의 신뢰성은 가장 높지만, 대상물의 제작 및 시험의 수행에 있어 경제성 및 방법적인 측면에서 여러 어려움이 존재하여 실제로 활용이 미흡하다. 또한, 대기압(1g) 상태에서 소형 토조를 이용한 축소 모형시험은 지반 거동 특성에 가장 큰 영향을 미치는 자중에 의한 응력상태를 재현하지 못하는 단점이 있다. 반면, 원심모형시험은 축소된 모형을 고속으로 회전시켜 실제 중력보다 매우 큰 가속도를 인위적으로 적용함으로써 현장의 실 응력상태를 구현할 수 있고, 대형 지반구조물의 설계와 시공 사이에 발생할 수 있는 지반거동의 괴리를 해소함과 동시에 다양한 변수를 고려하여 신뢰성 있는 현장의 응력상태를 재현할 수 있는 장점이 있다. 특히 수치해석이나 현장 구조물의 거동에서는 구현이 불가능한 극한상태의 파괴 특성까지도 눈으로 직접 확인할 수 있으므로, 지반 구조물의 복잡한 거동 메커니즘을 직접적으로 규명하기에 적합한 수단이다. 또한 진동대를 이용하여 원심모형시험을 수행할 경우 원심모형시험 중에 사용자가 원하는 크기와 형태의 지진을 모사할 수 있으므로, 이는 불확실성이 많은 지진 시 거동 특성을 적절히 파악할 수 있다.

원심모형시험의 기본 개념은 지반 구조물 모형(model)의 크기를 $1/N$ 으로 축소시키고 중력 가속도의 N 배로 가속시킴으로써 지반의 깊이별 응력상태를 원형(prototype)에 가깝게 모사함에 있다([그림 13]).

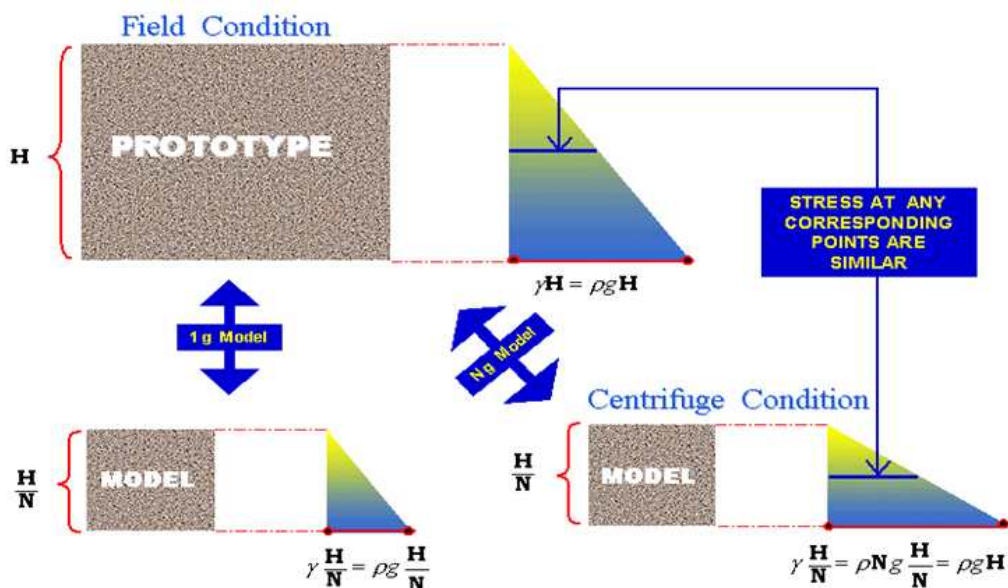


그림 13. 원심모형시험의 기본 개념.

원형과 동일한 밀도(ρ)로 제작된 축소 지반모형에 Ng 의 원심 가속도를 가하여 시험을 수행할 경우, 원형 깊이(h_p)에서의 수직응력(σ_{vp})과 모형 깊이(h_m)에서의 수직응력(σ_{vm})은 식 (1)과 (2)를 각각 표현된다. 이 때, h_p/h_m 이 N 의 비율로 만들어 진다면, 대응되는 각 깊이에서의 수직응력은 같아지게 된다.

$$\sigma_{vp} = \rho g h_p \quad \text{식 (1)}$$

$$\sigma_{vm} = \rho g N h_m \quad \text{식 (2)}$$

2. KAIST 동적원심모형시험기

국내 원심모형시험 시설은 90년대 중반 이후 기업체 및 대학을 중심으로 도입되기 시작하여, 압밀, 굴착, 연약지반, 기초거동, 사면, 댐 등 다양한 지반 구조물에 적용되어 왔다. 본 연구에서는 KOCED 사업의 일환으로 KAIST 지오센트리퓨지 센터에 도입되어 운영 중인 원심모형시험 시설을 이용하였으며, Ng 의 원심 가속도로 회전하는 중에 지진 모사가 가능한 진동대를 동시에 보유하고 있어 지반 구조물의 내진성능평가 관련 연구를 수행할 수 있는 실험 시설이다.

○ 원심모형시험기 (Geo-centrifuge, 지오센트리퓨지)

KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 원심모형시험기는 프랑스 ACTIDYN SYSTEMES SA의 C72-2 모델로 Beam 형태, 회전반경 5m, 최대 용량 240g-tons의 규모를 갖는다. 최대 2,400kg의 지반모형을 적재한 상태에서 100g의 원심가속도까지 구동이 가능하며, 1,300kg 적재하중에서 130g의 최대 원심가속도를 구현할 수 있다.

지반모형의 실험에서 사용되는 물과 공기압, 유압 등을 제공하기 위한 fluid rotary joint, 장비 내부의 컴퓨터 등을 통신으로 연결하여 정보를 전송하기 위한 1Gbps 급의 fiber optic rotary joint(FORJ) 또한 설치되어 있다. 실험에 따른 신호획득을 위한 신호계측장치(Data Acquisition System)는 회전팔 중앙 상부에 설치되며, National Instruments의 PXI 시스템으로 구성되어 있다. 기본적으로 스트레인게이지, LVDT, 가속도계와 같은 계측기 유형별로 총 196개 채널을 동시에 계측할 수 있도록 구성되었으며, 향후 사용자의 필요에 따라 확장 및 변경이 용이하다. 동적 실험의 경우 현재 구성된 모듈에 따라 제한적으로 최대 500kS/s의 신호 획득이 가능하다. 또한, 진동대 실험에 따른 지반 변형을 고속으로 촬영하기 위하여 초당 1,000 프레임으로 촬영할 수 있는 초고속 카메라, 정적 실험에서의 지반모형의 변형관측 및 상시 모니터링을 위한 범용 디지털 동화상 카메라 등을 설치할 수 있도록 구성되어 있다.

표 3. KOCED 원심모형시험시설의 주요 사양

구 분	사 양
제작사	ACTIDYN SYSTEMES SA, France
모델명	C72-2
회전반경 (Platform Radius)	5.0m
최대 용량	240g-tons
최대가속도	130g
최대 모델 중량	2,400kg (up to 100 g)
Payload 크기	1.2m(L) × 1.2m(W) × 1.2m(H)
Fluid rotary joint	Total 10 lines (air, water, oil)
Electrical slip ring	Total 42 lines (power, signal, video)
Fiber optic rotary joint	Data acquisition and video signal

○ 진동대 (Earthquake Simulator)

근래 들어 원심모형시험을 활용한 연구가 가장 활발히 진행 중인 분야 중 하나는 지반 구조물의 내진성능 평가 등과 관련된 지반지진공학 분야이다(Kimura, 1998). 이와 같은 실험은 원심모형시험 모델 하부에 진동대를 설치하여 회전 중에 가동함으로써 지반 하부의 진동을 모사하게 된다.

본 과업에 사용된 KOCED 진동대는 전기제어-유압방식(Electro hydraulic servo type)의 진동대로서, 앞서 설명한 회전 반경 5.0 m, 최대 240 g-ton 용량의 원심모형시험기에 설치되어 원심모형시험 중 지진운동의 모사가 가능하다. 적재하중이 없을 경우에는 최대 40g, 최대 적재하중 700 kg에 대해서는 최대 20g의 진동 가속도를 재현할 수 있고, 이는 최대 0.5g의 강진을 모사할 수 있는 가속도 수준이다(현재 국내 내진설계기준에 명시된 최대 설계 지진 가속도 : 0.22g). KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 진동대의 모습 및 주요 사양을 [그림 14] 와 [표 4] 에 각각 나타내었다.



(a) 진동대를 포함한 원심모형시험기



(b) 진동대

그림 14. KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 동적 원심모형시험 시설.

표 4. 진동대의 주요 제원

항 목	Actidyn System Q72-2 Earthquake Simulator
진동 방식	전기 제어 유압 방식
Payload 크기	0.67 m (L) × 0.67 m (W) × 0.65 m (H)
최대 모델 중량	700 kg
가용 원심 가속도 범위	10 - 100g
최대 지진 가속도 (모델이 없을 경우)	40g
최대 지진 가속도 (최대 모델 중량의 경우)	20g
최대 변위	6.5 mm
최대 속도	1.0 m/s
가용 하중 주파수 범위	40 - 300 Hz
지진 지속 시간 (최대 모델 중량 및 지진 가속도)	Max. 1초

[그림 15]는 진동대를 포함한 동적원심모형시험기의 구성을 나타낸 것으로 지반 모형에 지진 하중을 가하는 진동대 Basket, 지진 하중 발현을 위한 유압식 액추에이터(actuator)의 작동 및 거동을 모니터링하는 전기적 제어 시스템, 액추에이터의 작동을 위해 Accumulator에 Oil을 제공하고, 사용한 Oil의 저장소로 활용되는 유압 전원 공급 장치로 구성되어 있다.

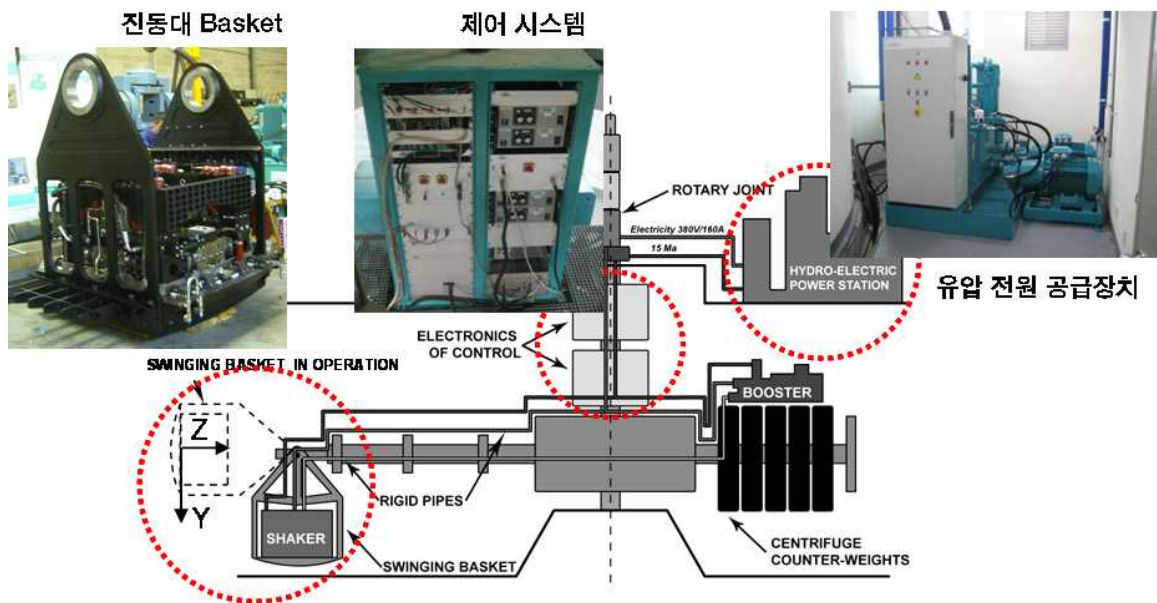


그림 15. 원심모형시험기에 장착된 2차원 진동대 구성도.

○ 등가전단보(Equivalent Shear Beam, ESB) 박스

동적 원심모형시험에서 고려해야 할 가장 중요한 사항 중 하나는 자연 지반의 무한한 경계 조건을 유한한 경계 조건을 가진 모델 박스에서 적절히 모사하는 것이다. 강성(Rigid) 박스에서 실험을 수행할 경우에는 지반의 변형률 부동성(Strain dissimilarity), 진동시 벽면으로 부터의 반사되는 P파의 영향(Reflection of P-wave) 등으로부터 자연 상태의 지반을 적절히 모사할 수 없었다. 이와 같은 모델 박스의 경계 조건 문제를 해결하기 위해, Whitman 등(1981)은 진동 방향에 대한 관성력과 전단 저항력이 없으며, 진동에 따른 지반의 변형이 그대로 벽면에 나타나는 Laminar 박스를 제안하였으며, 현재까지 1g 진동대 및 동적 원심모형시험에서 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 자연 상태의 지반은 공용 조건에서 어느 정도의 강성을 가지면서 지진 하중에 저항을 하기 때문에 이를 고려하여 Zeng과 Schofield(1996)는 ESB 박스를 제안하였다. ESB 박스는 Laminar 박스와 달리 지반의 강성과 유사한 강성을 가진 고무로 각 Frame 사이에 삽입하여 지반과 벽면의 경계에서 자연 상태의 경계 조건을 현실적으로 모사하고자 하였다([그림 16]). 따라서 액상화 현상과 같이 지반의 변형이 크게 발생하는 경우를 제외한 지반 구조물의 내진성능 평가, 지반 증폭특성 평가, 지반-구조물 상호작용 등 지진 시 Pre-failure 상태에서의 지반 동적 거동 특성을 평가하는데 적합할 것으로 판단된다. Zeng과 Schofield(1996)가 제안하는 ESB 박스의 기본 개념은 아래와 같다.

- ESB 박스의 2차원 단면상 벽면은 지반의 동적 전단강성과 등가의 강성을 갖는 전단보의 기능을 한다.
- ESB 박스의 2차원 단면상 경계 벽면은 주변 지반과 동일한 마찰력을 가진다.
- ESB 박스의 진동 방향과 평행한 벽면은 마찰이 없고, K_0 조건을 유지한다.
- ESB 박스의 벽면은 K_0 조건을 유지한다.

KAIST 지오센트리퓨지 실험센터에서 보유한 ESB 박스는 10개의 알루미늄 Frame 층으로 구성되어 있고, 각 Frame을 볼 베어링과 지반의 강성과 유사한 고무로 연결하여 지진 시 모델 박스에서 지반의 동적 거동과 유사한 거동을 보이도록 하였다. 현재 KAIST에서는 1차원, 2차원 진동대 시험을 위한 ESB 박스를 각각 1개씩, Rigid 박스 1개를 보유하고 있다. 모델 박스의 모습 및 주요 사양을 [그림 17] 과 [표 5] 에 각각 나타내었다.

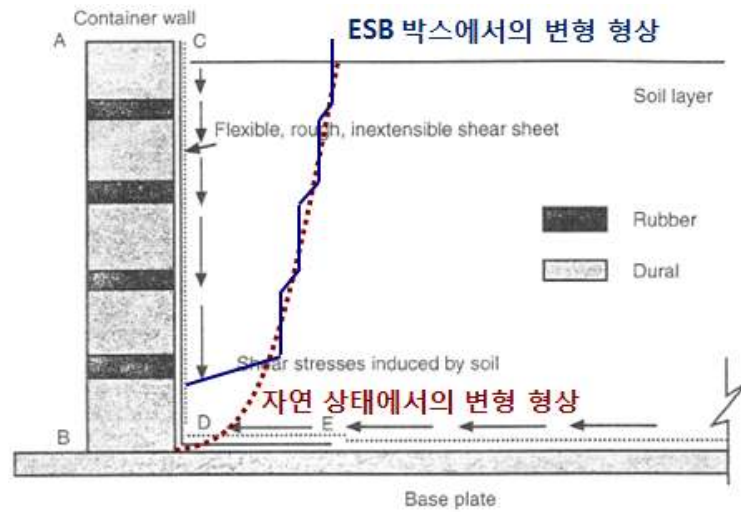
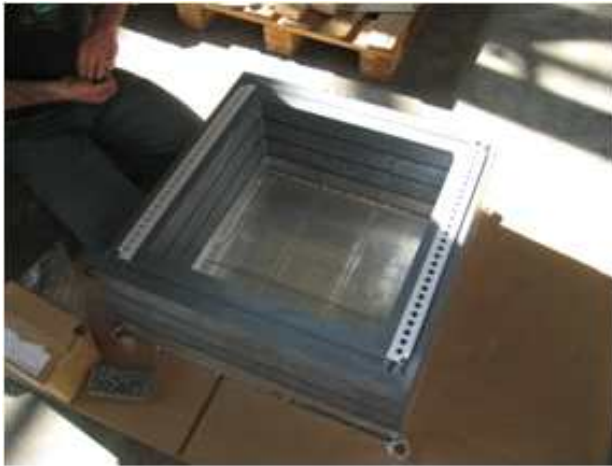


그림 16. ESB 박스의 기본 개념



(a) ESB 제작 모습



(b) 완성된 모델 박스

그림 17. KAIST 보유 모델 박스(ESB 2개, Rigid 1개).

표 5. KAIST 보유 ESB 모델 박스 주요 제원

구 분	사 양
외부 치수	650 mm (L) × 650 mm (W) × 650 mm (H)
내부 치수	490 mm (L) × 490 mm (W) × 630 mm (H)
알루미늄 Frame 층 수	10 층
각 알루미늄 Frame의 높이	60 mm
총 중량	145 kg

3. 상사 법칙

흙이나 암반 같은 지반 공학적 재료들의 비선형 거동 특성과 같은 재료적 특성이 구속 압에 영향을 많이 받는다. 따라서 모형 실험 시 이러한 구속 조건을 모사하는 것은 제대로 된 현상 규명에 필수적인 요소가 되고 있다. 원심모형시험은 중력 가속도를 물리적 모형에 가하여 이상적인 흙이나 구조물에 자중 응력 상태를 구현 할 수 있다. 이때 사용되는 물리적 모형은 실제 모형에 비하여 축소된 형태로 제작이 되므로, 축소 모형과 원형사이의 크기관계(상사법칙)을 합리적으로 반영하는 것이 필요하다.

원심모형시험 기법이 개발된 이후로 기존의 많은 연구자들에 의하여, 지반-구조물의 상호작용 모사를 위한 상사법칙이 제안되고 검증되어 왔다(Schofield 1980; Talyer, 1995).

원심모형시험은 실제 현장을 1/N로 축소시킨 기하학적 축소 모형을 모델링하고 실제 현장과 유사한 거동을 유발하기 위해, Ng의 원심가속장에서 다양한 시험을 수행하게 되며, 이때 계측되는 다양한 측정들은 [표 6]에 명시된 상사법칙을 적용하여 원형 구조물의 거동으로 환산하게 된다.

표 6. 원심모형시험의 주요 상사법칙

변수	모형/원형	차원
길이	1/N	L
속도	1	LT-1
가속도	N	LT-2
변형률	1	ML-1T-2
응력	1	ML-1T-2
힘	1/N ²	MLT-2
질량	1/N ³	M
투수 속도	N	LT-1
시간 (투수, 압밀)	1/N ²	T
시간 (동적)	1/N	T

특히, 지반공학 구조물의 재료는 철근 콘크리트이나, 이를 사용하여 원심 축소 모형을 제작하기는 거의 불가능하다. 원심 모형 시험을 위한 상사비를 만족시키기 위하여 일반적으로 알루미늄을 많이 사용된다. 알루미늄은 소형 시험체의 가공과 변형률계를 이용한 변형계측이 용이하여, 지반-구조물 상호작용 연구에서 구조물 모사에 많이 활용된다.

모형 벽체의 두께를 결정하기 위한 상사비는 식 (3)과 같고, 두 재료사이의 강성(EI)값의 식으로 구성된다(Stone 등, 1991).

$$E_m I_m = \frac{E_p I_p}{N^4} \quad \text{식 (3)}$$

이 때, E는 재료의 탄성계수(영의 계수)이고, I는 재료 단면의 2차 관성 모멘트이다. 2차 모멘트는 기준 단면을 어떻게 설정하느냐에 따라서 값이 달라지므로 측정하고자 하는 방향을 기준으로 한다.

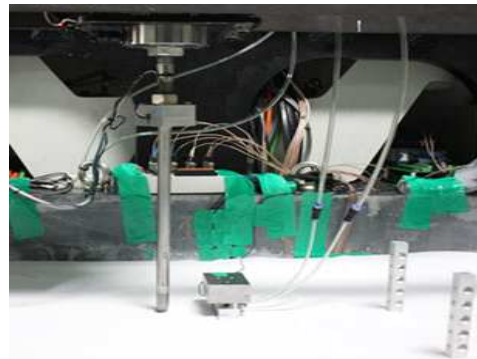
4. In-Flight 지반 물성 평가 (S-CPT)

원심모형실험에서의 SFSI 거동을 분석하기 위해서는 회전 시 모델지반의 공학적 특성을 정확히 평가 할 필요가 있다. 본 과업에서 이용한 건조 사질토 지반의 깊이에 따른 강성과 강도를 평가하기 위해 전단파속도 (V_s)와 콘관입저항치 (q_c)가 사용되고 있으며, 이는 각각 벤더엘리먼트 시험과 원심모형실험용 콘관입시험 (CPT, Cone Penetration Test)을 통해 주로 획득하고 있다. 하지만 이 두 가지 시험은 같은 지점에서 동시에 수행이 어려우며, 벤더엘리먼트 시험의 경우는 계측지점이 고정되어 있다는 점과 다짐지반에 적용이 어려운 점 등의 한계가 있다. 본 과업에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 가진장치와 함께 콘에 탄성과 수신기를 설치하여 콘관입저항치와 전단파속도를 동시에 구할 수 있는 탄성과콘관입시험 (SCPT; Seismic Cone Penetration Test) 시스템을 원심모형실험 환경에 맞게 개발하였다.

개발된 원심모형실험용 탄성과 콘 관입시험 시스템을 검증하기 위해 다음의 조건을 고려한 원심모형 실험을 수행하였다. 첫째로, 전단파의 전달 경로를 검증하기 위해 공압 실린더로부터 콘 관입 지점과 대칭이 되는 지점에 가속도계를 매설하여 전단파 속도를 계측하고 상호 비교 검증 하였다. 둘째로, 탄성과 콘 시스템을 통해 얻은 전단파 속도 주상도의 검증을 위하여 동일한 모형지반에 설치되어 있는 벤더 엘리먼트를 통해 획득한 전단파 속도 주상도와 비교를 수행하였다.



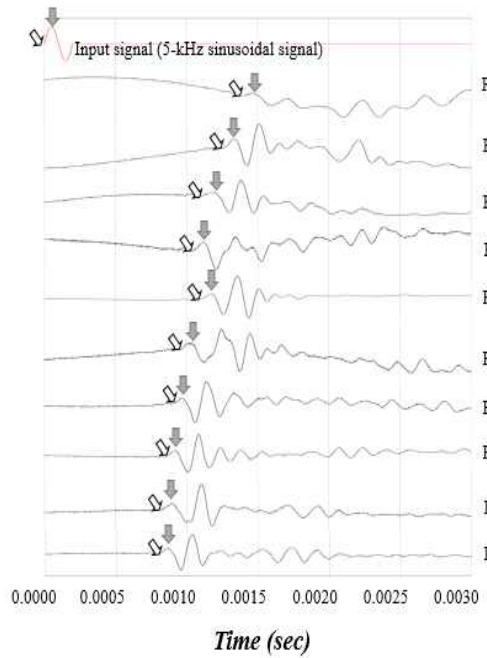
(가) 1축 수직액추에이터



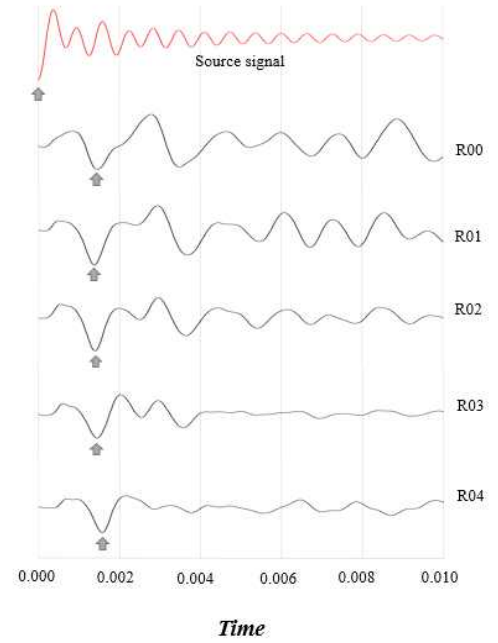
(나) 1축 수직액추에이터와 소형탄성과콘의 결합

그림 18. 소형탄성과콘 시스템

벤더 엘리먼트 및 탄성과 콘 수신 가속도계로부터 얻은 깊이별 전단파 신호는 [그림 19]에 도시하였으며, 이 신호를 통해 구한 전단파 속도 주상도를 동시에 도시하면 [그림 20]과 같다. 벤더 엘리먼트와 지중에 매설된 가속도계 및 탄성과콘 내부 가속도계로부터 구한 전단파 속도 결과는 깊이별 증가 추이가 비슷하며, 각 깊이별 속도 차이가 미미함을 확인하였다. 이 결과를 통해 다음의 두 가지를 확인 할 수 있었다. 첫째, 지중에 매설된 가속도계와 탄성과콘 내부 가속도계로부터 구한 전단파 속도 값이 거의 일치함을 확인함으로써 공압 실린더에서 발생한 전단파가 콘을 통해 전달되지 않고, 흙을 통해 전달되었음을 확인 할 수 있었다. 둘째, 벤더 엘리먼트로부터 구한 전단파 속도와 탄성과콘 내부 가속도계 결과값이 일치함을 확인함으로써 개발된 시스템을 통해 얻은 전단파 속도의 신뢰성을 검증할 수 있었다.



(가) 벤더 엘리먼트 전단파 신호



(다) 탄성파콘 전단파 신호

그림 19. 깊이별 전단파 신호

개발된 SCPT시스템을 통해 구한 콘관입저항치는 [그림 21]에 나타내었다. 같은 상대밀도 (83%)로 조성된 모형 지반에서 기 수행된 세 번의 실험 결과를 동시에 도시하였으며, 이 결과를 통해 개발된 탄성파콘으로 구한 콘관입저항치가 반복성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

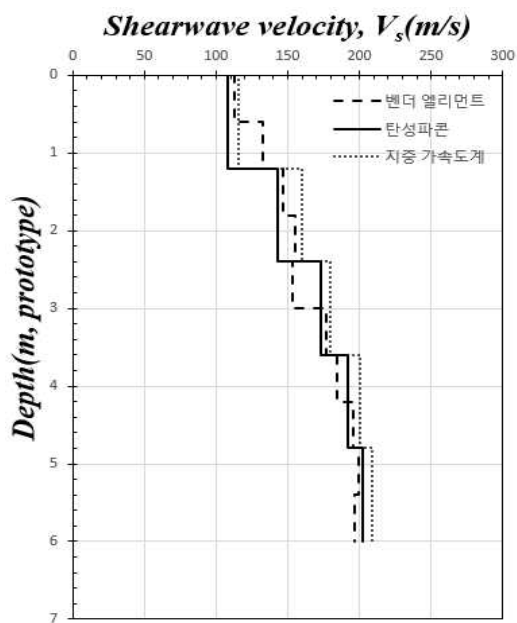


그림 20. 깊이별 전단파 속도 주상도

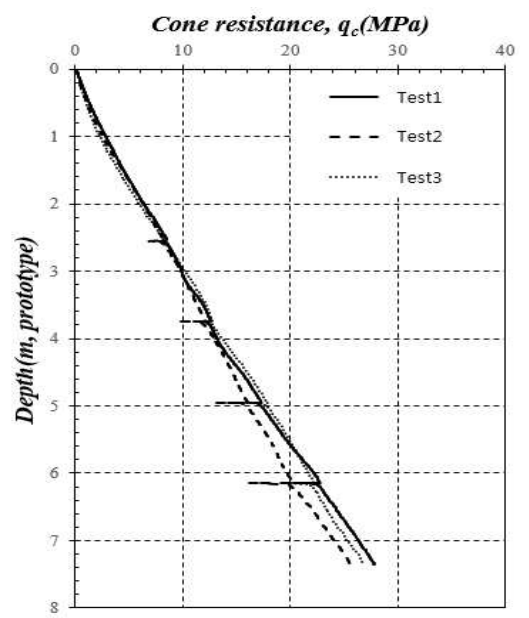


그림 21. 콘관입저항치 주상도

5. 지반-기초-구조물 상호작용 평가를 위한 동적원심모형실험의 거동 정의

본 과업에서 수행되는 원심모형실험의 가장 주된 목표는 지진 시 항복거동을 포함한 지반-기초-구조물 상호작용(Soi-Foundation-Structure Interaction, SFSI) 효과를 고려한 구조물의 거동과 SFSI 효과를 고려하지 않은 구조물의 거동을 비교하는 것이다. 이를 위해서 원심모형실험결과의 대부분은 ‘고정단 기초 거동’과 ‘유연단 거동, 두 가지 개념을 바탕으로 해석할 수 있다.

내진설계에서 구조물의 지진하중은 자유장 지표면 거동으로부터 얻어진 응답 스펙트럼으로부터 결정된다. 이때 구조물 거동은 구조물이 자유장 지표면에 고정되어 있다고 가정하고 계산되는데, 이를 ‘고정단 기초 거동(Fixed base motion)’으로 정의할 수 있다. 반면 항복 거동을 포함한 SFSI 효과를 고려하게 되면, 구조물 하부 고정조건은 상대적으로 유연하게 변하여, 실제 지반-기초-구조물 시스템의 거동은 고정단으로 가정한 설계 지진하중과 차이가 발생하게 된다. 이와같이 구조물 하부 고정조건이 상대적으로 유연한 실제 거동을 ‘유연한 기초 거동(Flexible base motion)’으로 정의할 수 있다.

원심모형 실험에서의 ‘고정단 기초 거동’과 ‘유연한 기초 거동’은 아래에 [그림 22]와 같이 얻을 수 있다. 우측의 그림은 원심모형실험에서 실제 계측되는 지반-기초-구조 시스템을 나타낸 것이고, 좌측의 그림은 고정단 조건에서의 가상의 단자유도 구조물을 보여준다. 지진 시에 구조물의 상부에 기록된 거동들은 기초의 수평적 움직임과 항복거동과 같은 SFSI 효과가 포함되어있으며, 이는 구조물의 수평방향 가속도($\ddot{u}_t$)와 기초의 수평방향 가속도($\ddot{u}_f$)는 가속도계를 이용하여 측정되었다. 구조물 상부의 응답에서 기초의 수평 응답을 제한 구조물 자체의 거동 나타내는 상대가속도($\ddot{u}_r$)는 ($\ddot{u}_r = \ddot{u}_t - \ddot{u}_f$)로 계산될 수 있다. 그리고 최종적인 구조물 자체만의 유연단 거동($\ddot{u}_{Flexible} = \ddot{u}_r - \ddot{u}_{rocking}$)은 기초의 회전거동에 의해서 발생하는 구조물 응답 ($\ddot{u}_{rocking}$)을 제하여 결정된다. 유연단 거동($\ddot{u}_{Flexible}$)은 지반-기초-구조물 상호작용 효과로 인해 발현되는 단자유도 구조물자체 거동을 나타내며, 이는 구조물 하부의 밑면 전단력과 관계가 된다.

반면 고정된 구조물의 가속도($\ddot{u}_{Fixed}$)는 실험에서 얻어진 자유장 지표면 거동($\ddot{u}_{free}$)으로부터 산출될 수 있다. 결정된 단자유도 구조물의 특성(질량 및 강성)을 바탕으로 구성 방정식을 이용하여 결정할 수 있다. $\ddot{u}_{Flexible}$ 과 $\ddot{u}_{Fixed}$ 의 차이는 지반-기초-구조물의 상호작용에 의한 효과를 보여줄 수 있어, 본 과업에서 수행되는 원심모형실험결과 분석에서 초점을 맞추어 분석하였다.

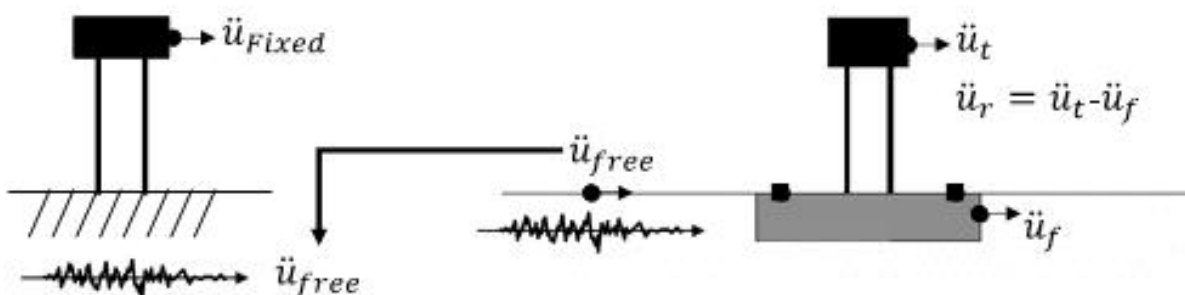


그림 22. 원심모형실험에서 고정단 기초 거동과 유연한 기초 거동의 정의

2절 연구수행과정 및 내용(이론적, 실험적)

1. 이론적 배경

가. 토목 및 건축 구조물의 지진 하중 산정법

일반적으로 단층운동에 의하여 지진이 발생하였을 경우 지진파는 암반 지대를 통하여 토사지반으로 전파되고, 토층을 통과하면서 지반의 동적 물성에 따라 지반 증폭 현상을 경험한 후 상부 구조물에 지진하중을 가하게 된다. 이러한 지표면에서의 증폭 정도는 건축물 하부 및 기반암 상부에 위치한 토사 지반의 두께(기반암 깊이), 전단파 속도(강성) 그리고 감쇠비에 따라 차이를 보이게 된다. 이와 같은 지반의 동적 물성치는 현재 건설 현장에서 널리 이용되고 있는 지반 조사 시험과 계측을 통해 정량적으로 평가되고 있으며, 구조물의 내진설계 및 내진성능평가에 활용되고 있다.

지진 시, 지표면에서의 최대 지반가속도 및 구조물에 가해지는 지진력을 결정하기 위해, 앞에서 언급한 바와 같이 건축물이 놓일 위치의 국지적인 지반조건을 신뢰성 있게 평가하는 것은 중요하다. 현재 국내 내진설계기준에서는 상부 30m의 지반 평균 전단파 속도($V_{s,30}$)를 이용하여 공학적으로 지반을 분류하고, 각 지반종류에 따라 설계응답스펙트럼을 달리 적용하여 건축물에 작용하는 지진하중을 산정하고 있다. 건축구조설계기준(2009)에서는 5% 감쇠비에 대한 표준 응답 스펙트럼을 다음 순서로 정의하고 있다.

- ① $T \leq T_0$ 일 때, 스펙트럼 가속도 S_a 는 식 (4)와 같다.
- ② $T_0 \leq T \leq T_s$ 일 때, 스펙트럼 가속도 S_a 는 S_{DS} 와 같다.
- ③ $T > T_s$ 일 때, 스펙트럼 가속도 S_a 는 식 (5)과 같다.

$$S_a = 0.6 \frac{S_{DS}}{T_0} T + 0.4 S_{DS} \quad \text{식 (4)}$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad \text{식 (5)}$$

여기서, T 는 구조물의 주기(초), S_{DS} 는 단주기 설계스펙트럼 가속도, S_{D1} 은 주기 1초에서의 설계스펙트럼 가속도, $T_0 = 0.2 S_{D1} / S_{DS}$, $T_s = S_{D1} / S_{DS}$

이와 같이 하부 지반 조건에 따른 지반 분류와 이에 상응하는 응답스펙트럼으로 지진하중을 산정하는 절차는 상부 구조물의 하부지지 조건이 고정되어 있다는 전제를 바탕으로 이루어지게 된다. 즉, 고유의 질량과 강성으로 표현되는 단자유도 구조물의 응답을 바탕으로 설계에 필요한 지진력을 산정하는 것이다. 이러한 지진하중 산정 절차는 지반-기초-구조물의 상호작용을 복합적으로 고려하기 힘들 뿐 아니라, 기초의 강성이나 구조에 의한 효과를 무시하기 때문에 설계 비용이 과다하게 산정될 우려가 있다.

나. 얇은 기초의 극한 모멘트 지지력 (Ultimate moment capacity)

지진 시 상부구조물에서 발생한 지진하중에 의해 얇은 기초는 모멘트 힘을 받게 되며, 그로 인해 기초는 회전하게 된다. 기초가 회전함에 따라 기초 하부지반면은 둥글게 변화하며 이러한 변형을 지반의 원형현상(soil surface rounding)이라 한다([그림 23]). 지반의 원형현상이 발생하면서 지반면의 곡률이 증가하고, 이로 인해 기초와 지반의 접촉면이 한 쪽 끝으로 이동하며 점점 감소한다. 기초의 회전이 계속될수록 접촉면적은 감소하다가 특정한 값에 수렴하게 되며, 이 상태를 임계상태(critical state)라 한다. 임계상태에서의 기초와 지반면의 접촉면적은 임계접촉면적(critical contact area, A_c)이라 하며, 임계접촉면적은 상부하중을 지탱할 수 있는 지반의 최소 면적이다(Deng 등, 2011). 또한 임계상태에서 지표면에 놓인 기초가 받는 전도모멘트는 기초의 극한 모멘트 지지력(Ultimate moment capacity, M_{ult})과 같으며, 극한 모멘트 지지력의 식은 다음과 같다.

$$M_{ult} = \frac{V \times L}{2} \left[1 - \frac{A_c}{A} \right] \quad \text{식 (6)}$$

여기서 V : 지반에 작용하는 시스템의 전체하중, L : 기초의 폭, A_c : 임계 접촉 면적, A : 기초면적

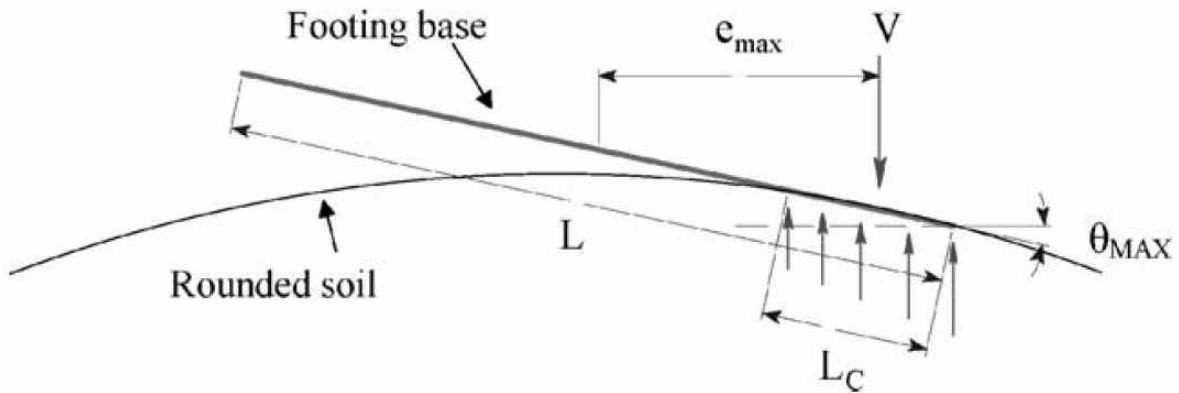


그림 23. 회전 기초에 의한 지반의 원형현상 (S. Gajan 등, 2005)

이때 기초의 너비가 일정하다는 가정을 통해 임계 접촉 면적과 기초 면적의 비를 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$\frac{A_c}{A} = \frac{L_c \times B}{L \times B} = \frac{L_c}{L} \propto \frac{1}{FS_V} \quad \text{식 (7)}$$

여기서 L_c : 임계 접촉 폭, B : 기초의 너비, FS_V : 시스템의 수직 안전율

Gajan 등(2005)와 Deng 등(2011)은 극한 모멘트 지지력을 결정하는 L_c/L 값은 수직 안전율(FS_V)에 반비례하며 보편적인 극한 지지력 식을 통해 구할 수 있음을 밝혔다. 안전율이 상대적으로 큰 시스템, 즉 지반변형이 작게 발생하는 시스템은 식(6)과 (7)에 의해

보다 큰 극한 모멘트 지지력을 갖는다. 따라서 극한 모멘트 지지력은 회전거동 시 지반변형을 결정하는 중요한 요소이다.

극한 모멘트 지지력이 약한 시스템은 상부구조물의 지진하중을 줄일 수 있는 장점이 있지만, 지반 변형을 많이 발생시키는 단점이 있다. 반대로 극한 모멘트 지지력이 강한 시스템은 상부구조물의 지진하중을 크게 하는 단점이 있지만, 지반 변형을 줄일 수 있는 장점이 있다. 이와 같이 극한 모멘트 지지력의 조건에 따라 지진 시 구조물의 지진하중과 지반변형은 상반되는 결과를 나타낸다. 이러한 영향을 고려하여 설계자들에게 적절하고 정확한 얇은 기초의 극한 모멘트 지지력 값을 제시해주는 것이 중요하다. 또한 기존 연구에서 제시한 얇은 기초의 극한 모멘트 지지력 식(6)은 지표면에 놓인 기초에 해당한다. 그러나 실제 얇은 기초는 대부분 근입된 상태로 시공된다. 따라서 근입된 얇은 기초의 항복거동 및 극한 모멘트 지지력을 평가 할 필요가 있다.

다. 회전 기초(Rocking Foundation)의 개념

현행 내진 설계기준에서는 하부 기초의 안전율을 크게 고려하여 기초의 하부지반이 아닌 상부 구조물에서 지진 하중을 저항하도록 하여 구조물에서 항복이 발생하도록 유도하고 있다([그림 24]). 이러한 현행 설계 기법은 하부 기초를 필요 이상으로 과다 설계하고 있으며 하부 지반에서 전달되어 오는 지진 에너지를 감쇠 없이 그대로 상부 구조물에 전달하게 되므로 상부 구조물 또한 과다 설계하고 있다. 얇은 기초 설계는 파괴 시, 유지보수가 힘든 기초-지반 시스템을 단단히 한다는 측면에서 합리적이고 보수적인 설계로 보일 수 있으나, 단단한 기초 시스템 거동으로 인하여 대형 지진이 발생할 경우에는 오히려 상부 구조물에 큰 지진하중을 전달하는 불안정한 설계 방식이 될 수 있다. [그림 25]는 1995년 일본 고베에서 발생한 지진으로 인하여 푸케 교량(Fukae Bridge)의 18개보가 붕괴된 모습으로, 기초를 강하게 설계하여 상부 구조물에서 모든 지진 에너지를 저항하게 되면 강한 지진에 매우 취약한 지진 저항 능력을 보여주고 있다.

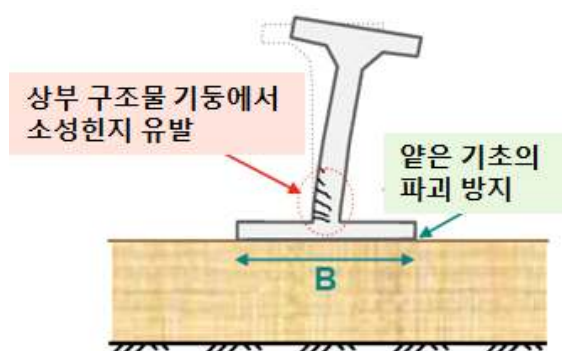


그림 24. 얇은 기초의 현행 내진설계 개념 그림 25 현행 설계 개념으로 설계된 교량의 붕괴

앞서 언급된 현행 내진설계 기준의 문제점인 강한 기초의 강진 시 지진 저항 능력 감소 및 막대한 건설비용의 문제점을 해결하기 위해서, 얇은 기초의 항복 거동을 활용하여 설계하는 회전 기초(Rocking Foundation) 설계 개념이 활발하게 연구 되고 있다. 이는 기존 설계 개념과 다른 개념으로 기초의 안전율을 작게 설계하여 기초-지반 시스템의 지

지력 항복 및 기초의 지진 시 변위를 유도하고 지진 에너지를 흡수하는 소성힌지를 기초-지반 시스템으로 이동시켜 상부 구조물의 파괴를 최소화하는 설계 기법이다([그림 26]). 많은 연구 결과 및 관측 결과에서 회전 기초 개념을 이용할 경우에는 얇은 기초 하부에서 매우 많은 지진 에너지 감쇠가 발생하여 [그림 27]과 같이 대형 지진에도 지반-기초-구조물 시스템의 붕괴는 발생하지 않는다. 향후 기초의 침하 조건에 대한 상세한 해석이 가능할 경우, 기초의 항복 거동을 이용하여 경제적이고 안전한 기초 및 상부 구조물 설계가 가능할 수 있다.

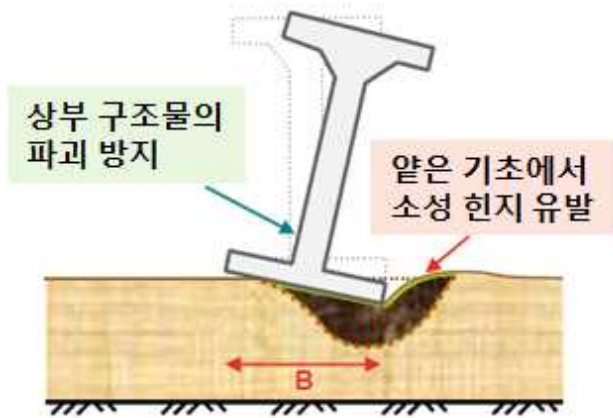


그림 26. 회전기초의 개념



그림 27. 얇은 기초에서의 소성힌지 거동 예 (1999, 터키)

식 (6)에서 정의된 정사각형 기초의 최대지지 모멘트와 상부 구조물에 의해서 유발되는 전도 모멘트 사이의 관계식을 이용하면, 회전운동이 유발될 때 상부 구조물의 최대 지진 가속도를 다음 식 (8)과 같이 결정될 수 있다.

$$S_a \leq S_{a,\max} = \frac{M_{ult}}{m_s \cdot h} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_t}{m_s} \cdot \frac{L}{h} \cdot \left(1 - \frac{q}{q_c}\right) \quad \text{식 (8)}$$

S_a : 상부 구조물의 지진가속도

$S_{a,\max}$: 상부 구조물의 최대 지진가속도

M_{ult} : FEMA 356에서 정의된 정사각형 기초의 최대지지 모멘트

m_t : 얇은 기초와 상부 구조물을 포함하는 총 질량

m_s : 상부 구조물의 등가 질량

L : 정사각형 얇은 기초 한 면의 길이

h : 상부 구조물의 무게중심까지 높이

q/q_c : 얇은기초 최대 지지력 대비 시스템 수직 하중의 비

라. 지반-기초-구조물 동적 특성 변화

지반-기초-구조물 상호작용은 지반 및 기초 구조물의 강성과 감쇠를 스프링과 댐퍼로 모사함으로써 [그림 28]과 같이 단순화가 가능하다. 상부 구조물은 유효 높이 h 를 가지고 있는 단자유도 구조물로 표현될 수 있다. 이때 하부와 상부 구조물의 고정 조건은 스프링에 의해서 지지되므로 기존 응답스펙트럼 산정 시 이용되는 고정단 조건 보다 유연하다. 이러한 단순화 모델은 단층 빌딩 또는 일차 모드 거동에 지배적인 다층 빌딩에 대한 표현으로 가능하다.

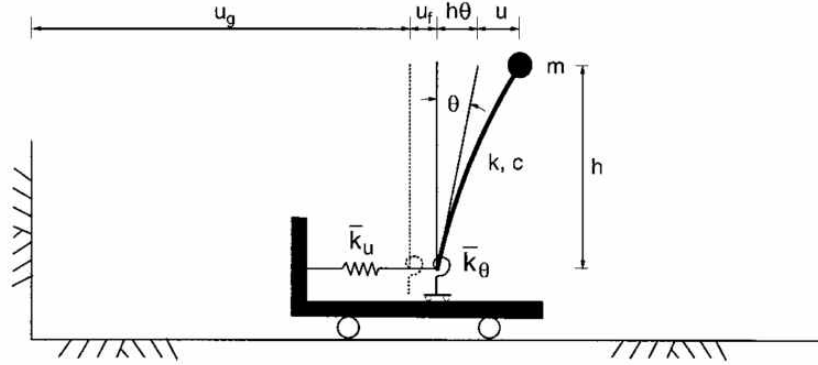


그림 28. 말뚝 기초 구조물 시스템의 지반-기초-구조물 상호작용

Veletos와 Meek(1974)는 앞서 [그림 28]에 표현된 유연한 지반-기초-구조물 시스템의 상부 구조물의 최대 지진 거동을 등가 시스템 특성을 가지는 고정단 모델로 예측하는 방법을 개발하였다. 다시 말해, 지반-기초-구조물 상호작용에 의해서 얻은 기초-구조물 시스템의 등가 시스템 동적 특성(시스템 주기 및 감쇠비 등)이 유연한 고정 조건에 맞게 변화하게 되고, 이에 대응되는 특성을 이용하여 기존 응답 스펙트럼 산정법과 같이 지진 하중을 쉽게 산정할 수 있게 되는 것이다. Veletos와 Meek(1974)에 의해서 제안된 유연한 시스템의 동적 특성 변화 식은 다음과 같다.

$$\tilde{T} = T_n \cdot \sqrt{1 + \frac{k_s}{K_x} + \frac{k_s h^2}{K_\theta}} \quad \text{식 (9)}$$

k_s : 고정단 조건의 단자유도 구조물의 강성

h : 기초부터 단자유도 구조물 질량의 무게중심까지 거리

K_x 와 K_θ : 기초의 수평 및 회전 강성

$$\beta_0 = a_1 \cdot \left(\frac{\tilde{T}_{eq}}{T_{eq}} - 1 \right) + a_2 \cdot \left(\frac{\tilde{T}_{eq}}{T_{eq}} - 1 \right)^2 + \frac{\beta_i}{(\tilde{T}_{eq}/T_{eq})^3} \quad \text{식 (10)}$$

$\tilde{T}_{eq}/T_{eq}$: 등가 고유주기 증가 비

a_1 와 a_2 : 기초 감쇠비 계수 (FEMA 440)

β_i : 상부 구조물의 초기 감쇠비

2. 국·내 외 연구동향

기초의 항복 거동을 허용할 경우 상부 구조물의 강진에 대한 안정성 증가 및 기초-지반 시스템의 지진 에너지 감쇠효과에 대한 연구는 1970년대 미국의 Housner(1963)과 뉴질랜드의 Bartlett(1976)과 Wiessing(1979) 등에 의해서 처음 시작되었다.

이 후, 그리스의 Rion-Antirion 교량의 설계 시에 회전 기초 및 기초의 항복 거동을 이용할 수 있는 기초의 형태를 적용된 사례가 있다 (Pecker, 2006). 교량 설치 지역의 암반이 해협 밑 깊은 깊이에는 연약지반에 자리하고 있고, 리히터 규모 6의 강진이 지난 40년 동안 7번이나 발생하여 안정적으로 지진 하중을 견딜 수 있는 혁신적인 내진공법이 요구되었다. 이를 위해 새로운 설계 개념과 지반 보강을 효율적으로 적용시켜 얇은 기초로도 충분히 정적, 동적 안정성을 확보 가능하다는 것을 실험적으로 규명한 후 실제 시공에도 반영하였다. 이때 하부 연약지반에는 지반 개량을 위한 말뚝 그룹이 설치되었으며, 얇은 기초와 말뚝 그룹 사이 지표면에서는 자갈층을 조성하여 기초의 항복 거동을 발생시키고 지진 시 소성 거동을 통한 지진 에너지 감쇠를 유도하였다. [그림 29]는 Rion-Antirion 교량에 적용된 기초 설계의 모식도이다. 이러한 지반 보강 및 얇은 기초 설계 기법은 기존에 적용된 바가 없기 때문에 성능에 대한 평가 및 검증이 매우 중요하여 다양한 수치해석과 원심모형실험을 통하여 기초의 정적 및 동적 안정성을 평가한 후 실제 교량 건설에 적용되었다.



그림 29. Rion-Antirion 교량에 적용된 새로운 얇은 기초 설계

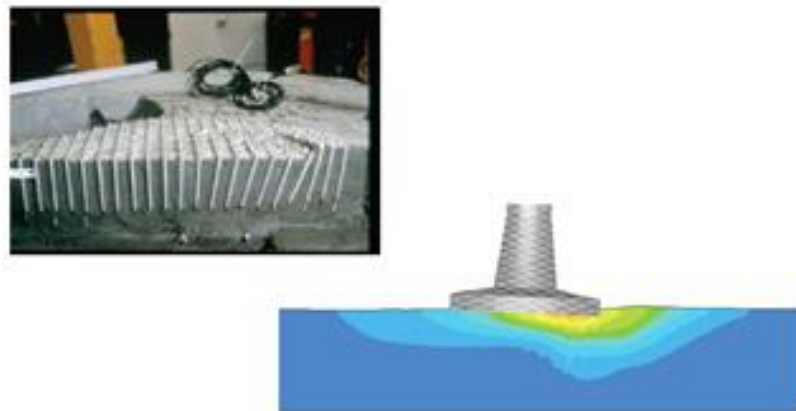
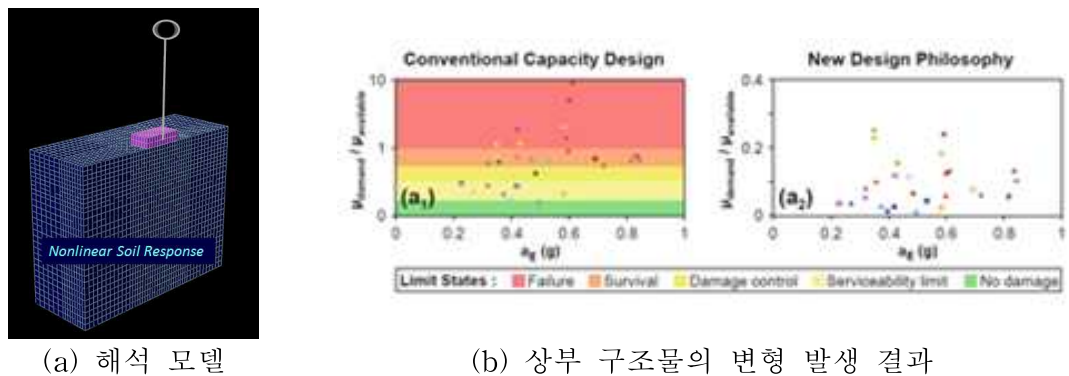


그림 30. 원심모형실험 및 수치해석을 통한 얇은 기초
시공법에 대한 성능 평가

뿐만 아니라, 1980년대부터 최근까지 매우 다양한 종류의 시스템에 대한 회전 운동 거동 연구가 수치 해석을 통해서 수행되어 오고 있다. Wolf(1976)는 들뜸 현상이 일어나는 기초 시스템에 대해서 연구를 수행하였으며, Chopra and Yim(1985)는 유연한 바닥 위에 놓여지는 회전 기초 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 그리스의 Anastasopoulos (2010)가 유한 요소 해석을 통해서 입력 지진의 하중 크기에 따라서 현행 설계 기법과 회전 기초 설계 기법을 비교하는 연구를 수행하였고, 이를 바탕으로 강진 시에는 회전 기초의 지진 에너지 감쇠 효과로 인해 상부 구조물의 변형이 현격히 감소 할 수 있음을 보여 주었다. 또한 Gazetas(2013)는 수치해석 및 설계를 위한 회전 기초의 비선형 정적 강성 값을 수치해석을 통해 발표한 바 있다[그림 31].

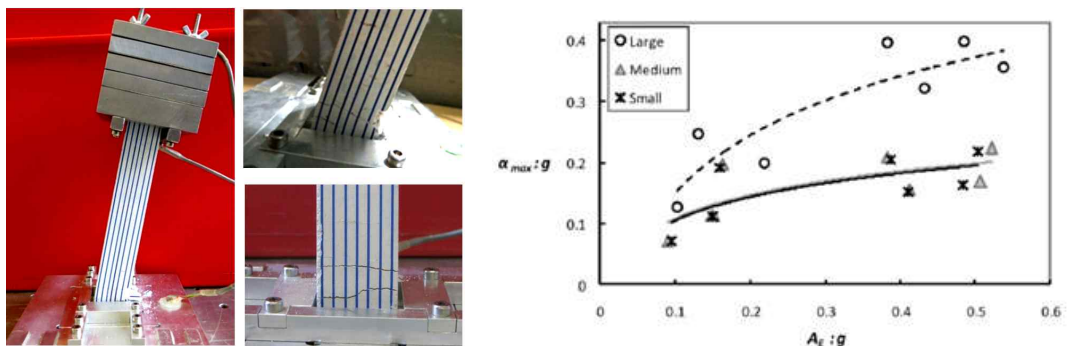


(a) 해석 모델

(b) 상부 구조물의 변형 발생 결과

그림 31. 수치해석을 통한 회전 기초 개념의 검증 평가

일본의 Shirato(2008)는 1g 진동대 실험을 통해서 얇은 기초 위에 놓여있는 잔교(pier)의 지진 시 거동을 관찰 하였으며, Paolucci(2008)은 수치해석을 통해서 1g 진동대 실험 결과와 비교 검증하는 연구를 수행하였다. 상기 연구 모두, 기초의 들뜸 현상 등 기초의 항복 거동을 허용할 경우 에너지 소산 및 지진 시 구조물의 중심이 지속적으로 유지되는 현상을 보여주고 있다. 그리고 Drosos(2012)는 다양한 크기의 얇은 기초위에 놓여져 있는 단자유도 구조물에 대한 지진 시 거동 평가를 위해 1g 축소 모형 실험 수행하였으며, 기초의 크기가 작을수록 지진 하중에 대한 감쇠효과가 크게 발생하지만 침하도 함께 많이 유발 되므로 설계 및 시공 시 고려될 필요가 있음을 보여주었다. 또한 1g 축소 모형 실험은 지반의 현장 응력 조건을 재현할 수 없는 한계를 가지고 있으므로 이에 대한 고려가 필요함을 언급하고 있다.

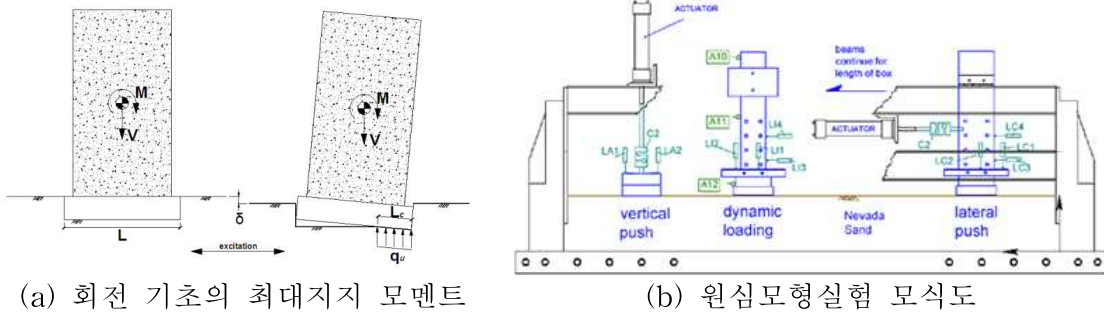


(a) 축소 모형 실험

(b) 입력 가속도에 따른 지진 하중 변화

그림 32. 얇은 기초의 크기에 따른 상부 단자유도 구조물 지진하중 평가

회전 기초 개념에 대한 원심모형실험 연구를 가장 활발히 수행하고 있는 연구팀은 미국 Davis 대학 연구진으로 Gajan(2008)와 Gajan&Kutter(2009)는 원심모형실험을 활용하여 다양한 하중 조건에 따른 얇은 기초의 하중 침하 관계를 도출하고 이로부터 회전 기초의 에너지 감쇠 효과와 기초-지반 시스템의 항복거동이 상부 구조물 거동에 미치는 영향 요소 등을 평가하였다[그림 33]. 또한 이를 바탕으로 회전 기초의 수치해석을 위한 기초-지반 인터페이스 모델을 개발하였다. 그러나 상기 연구 결과를 포함한 대부분의 연구 결과에서도 회전 기초의 지진 시 침하 및 지진 후 보강에 대한 문제는 여전히 남아 있어 실제 설계 적용 및 시공 기술 개발에 어려움을 겪고 있다.



(a) 회전 기초의 최대지지 모멘트

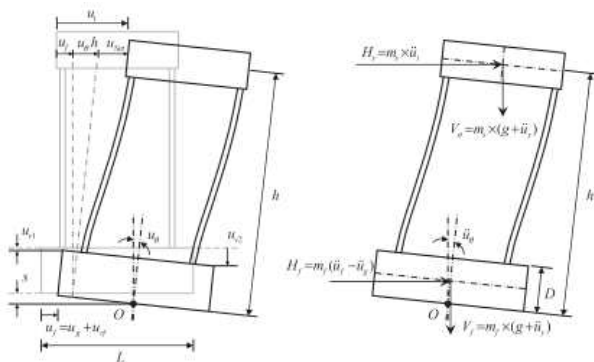
(b) 원심모형실험 모식도

개념

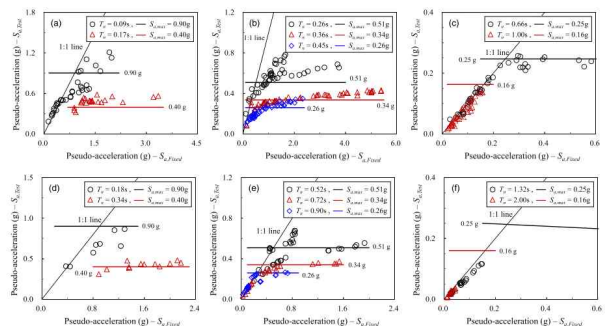
그림 33. 원심모형실험을 통한 기초 동적 거동

2010년을 기준으로 하여 이전에는 수치해석, 축소 모형실험, 동적 원심모형실험을 통하여 기초의 항복을 이용하는 회전 기초 개념의 현행 설계 기준 대비 장점에 대한 평가와 검증에 초점이 맞추어져 있었던 반면 2010년 이후 최근에는 회전 기초 개념의 실제 적용 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Deng&Kutter(2012)는 회전 기초 설계 개념을 교량에 적용 시키는 원심모형실험을 수행하였으며, 이와 함께 콘크리트 패드를 활용하여 회전 기초의 침하 방지 가능성을 확인하였다.

국내에서도 회전 기초에 대한 관심이 증가하여 이에 대한 연구가 진행되고 있는데, 조양희 등(1990)은 기초의 부분적 들림이 지반-구조물 상호작용 시스템의 지진응답에 미치는 영향을 해석을 통해서 보여주었다. 그리고 김동관 등(2014)은 얇은 기초의 최대지지 모멘트에 의해서 상부 구조물의 지진 시 거동이 제한될 수 있음을 원심모형실험을 통해서 보이고, 얇은 기초 자체 감쇠비에 의한 최대 지진하중의 증가폭을 보여주었다.



(a) 얇은 기초 거동 모식도



(b) 얇은 기초의 지진하중평가

그림 34. 원심모형실험을 통한 얇은 기초 위 상부 구조물 지진하중 평가

3절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등

1. 원심모형실험을 이용한 기초 항복거동 및 에너지소산 메커니즘 규명

가. 기초 항복거동 메커니즘 분석을 위한 정적 원심모형실험 (수평 반복하중)

본 연구에서는 세장비가 다른 3가지 근입된 기초에 대해 원심모형실험을 통한 수평반복하중 실험을 수행하였다. 실험의 주요 변수는 구조물의 높이와 기초 폭의 비인 세장비로 이는 동일한 기초에 높이가 다른 구조물을 사용함으로써 구현하였다. 또한 지반은 실트질이 포함된 새만금(SM)흙을 상대밀도 40%로 느슨하게 조성하였다. 본 실험의 결과를 바탕으로 근입된 기초의 회전거동 시 토압변화를 통한 회전거동의 메커니즘을 관찰하고, 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력을 평가하였다.

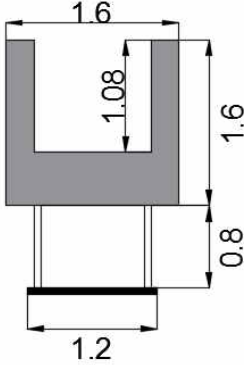
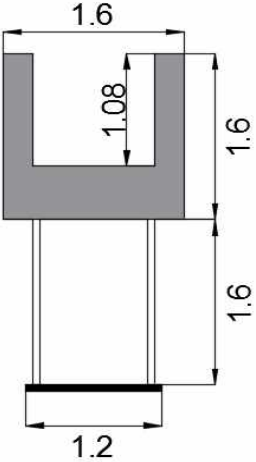
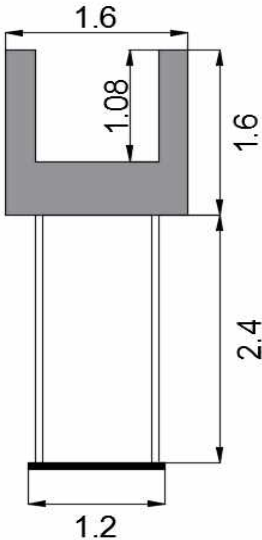
(1) 수평 반복하중 원심모형실험 모델링

(가) 단자유도 구조물 및 얇은 기초 모델링

항복거동 시 발생하는 얇은 기초의 회전거동과 수평거동은 시스템의 세장비에 의존한다. 세장비(h/L)는 시스템의 질량중심이 위치한 높이(h)를 기초의 폭(L)로 나눈 값이다. 세장비(h/L)가 1보다 작은 시스템은 항복거동 시 회전거동보다 수평거동이 지배적이며, 반대로 세장비가 1보다 큰 시스템은 항복거동 시 회전거동이 지배적이다(Gajan 등, 2009). 따라서 본 연구에서는 시스템의 세장비를 조절하기 위하여 높이가 다른 3가지 단자유도 구조물을 사용하였다. 단자유도 구조물 각각의 모델 제원은 [표 7]과 같으며, 모두 강철로 제작되었다. 제작된 실험체는 단자유도 모델을 재현하기 위해 구조물의 머리(top)에 질량이 집중되게 하였다. 단자유도 구조물의 머리는 U자 형태를 띠고 있는데, 이는 구조물에 수평반복하중 재하 시 하중 재하를 보다 용이하게 하기 위함이다.

한편, 항복거동 시 발생하는 지반변형은 기초의 극한 모멘트 지지력(M_{ult})에 의존하며, 극한 모멘트 지지력(M_{ult})은 기초의 면적(A)과 기초와 지반면의 임계 접촉 면적(critical contact area, A_c)의 비(A/A_c)에 의존한다. 본 연구에서는 세장비에 따른 지반변형을 관찰하기 위하여 적절한 지반변형을 야기할 수 있는 A/A_c 값을 10으로 산정하고, 그에 따른 얇은 기초의 크기를 정하였다(Gajan 등, 2008). 얇은 기초 모델로는 모델 수준(model scale)으로는 0.25kg, 원형 수준(prototype scale)으로는 2000kg의 정사각 알루미늄 기초를 사용하였으며, 3가지 높이가 다른 단자유도 구조물에 동일하게 사용하였다([그림 35]). 얇은 기초와 단자유도 구조물은 볼트로 결합시켰으며, 두 실험체는 수평반복하중 실험 중 강체(rigid)거동한다고 가정하였다.

표 7. 단자유도 구조물 모형 제원 (원형 수준)

구조물 모형	SDOF1	SDOF2	SDOF3
단위 (m)			
유효 질량 (ton)	21.27	21.71	22.13
유효 높이(h) (m)	1.36	2.1	2.8
기초 폭(L) (m)	1.4	1.4	1.4
세장비(h/B)	0.97	1.5	2
유효 강성 (kN/m)	56615	13372	3881
고유 주기 (sec)	0.124	0.253	0.465

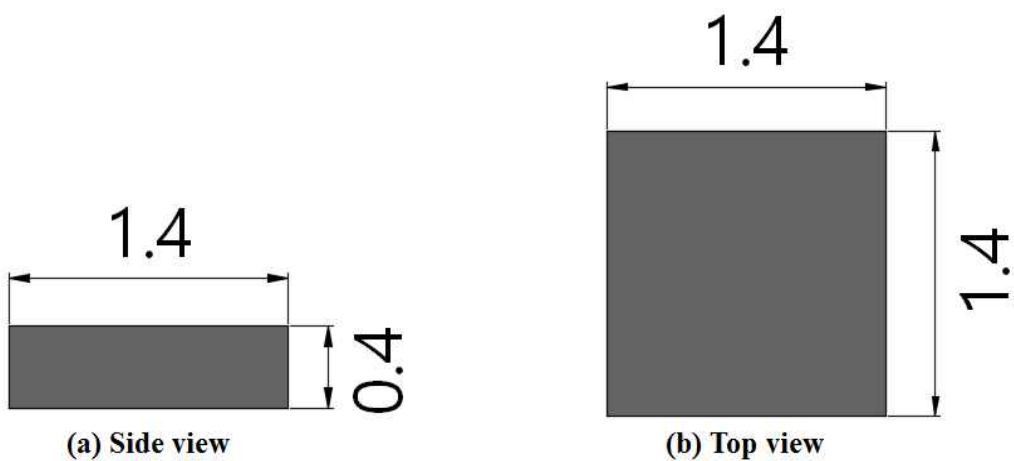


그림 35. 얕은 기초 모형 단면 (원형수준, 단위: m)

(나) 지반 모델링

지반조성에는 실트질이 포함된 사질토(SM)인 건조한 새만금 흙을 사용하였다. 새만금 흙의 균등계수(C_u)는 2.11이며, 평균입경(D_{50} , mm)은 0.080이다. 기초의 회전거동으로 인한 지반변형을 극대화하기 위하여 지반은 40%의 느슨한 상대밀도로 결정하였다. 지반조성에 앞서 ASTM D-4253에서 제시된 실험을 통하여 새만금 흙의 최대 건조 단위중량($\gamma_{d(max)}$)과 최소 건조 단위중량($\gamma_{d(min)}$)을 평가하였다. 이후 목표로 하는 상대밀도를 선정하고 상대밀도와 최대 건조 단위중량($\gamma_{d(max)}$), 최소 건조 단위중량($\gamma_{d(min)}$)의 관계식을 통해 지반조성에 필요한 건조 단위중량(γ_d)을 도출하다.

$$D_r = \frac{\left[\frac{1}{\gamma_{d(min)}} \right] - \left[\frac{1}{\gamma_d} \right]}{\left[\frac{1}{\gamma_{d(min)}} \right] - \left[\frac{1}{\gamma_{d(max)}} \right]} = \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{d(min)}}{\gamma_{d(max)} - \gamma_{d(min)}} \right] \left[\frac{\gamma_{d(max)}}{\gamma_d} \right] \quad \text{식 (11)}$$

D_r : 지반의 상대밀도, $\gamma_{d(max)}$: 최대 건조 단위중량, $\gamma_{d(min)}$: 최소 건조 단위중량, γ_d : 건조 단위중량

이에 맞추어 지반조성은 계산된 건조 단위중량(γ_d)과 토조의 부피를 고려하여 지반의 무게를 산정하고, 이에 맞게 층 다짐으로 조성하였다. 지반모델은 20cm의 높이, 원형기준으로 4m의 지반을 모사하였다. 상대밀도 40%로 조성된 지반의 마찰각은 37.3° 로, 새만금 흙의 불규칙한 입자표면에 의해 상대적으로 높은 마찰각을 가지며, 이는 본 연구에 앞서 수행된 기초모델의 수직재하 실험을 통해 얻은 극한지지력을 Meyerhof (1951)방정식으로 역계산하여 구하였다. 지반조성을 위해 사용된 토조는 폭, 너비, 높이가 각각 99.5cm, 99.5cm, 47.5cm인 사각 토조를 사용하였다([그림 36]).

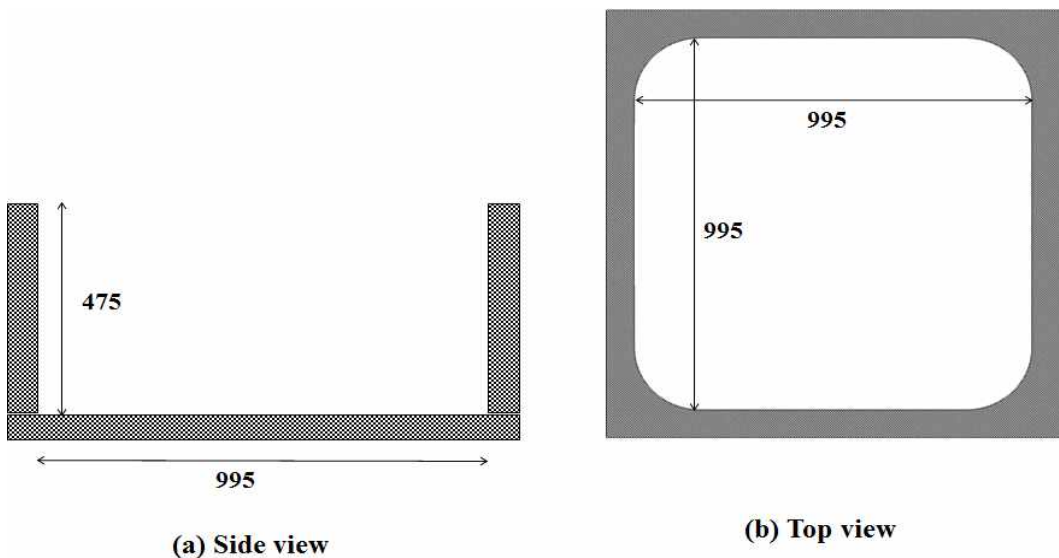


그림 36. 사각 토조 단면 (단위: mm)

(다) 수평반복하중 실험 (Slow cyclic test)

최근 수십 년간 “회전 기초(Rocking foundation)”에 관한 실험적 연구는 크게 동적실험과 수평반복하중 실험을 통해 연구되었다. 수평반복하중 실험은 느린 주기의 수평변위를 실험체에 반복적으로 가하는 실험이다. 느린 주기의 변위가 구조물 상부에 가해지기 때문에 기초와 구조물이 고정된 상태로 동일하게 거동하게 되므로 실험체 거동 해석 시 구조물의 관성력을 배제할 수 있다. 또한 수평반복하중 실험은 관성력을 배제하기 때문에 구조물에 가해지는 하중이 기초의 거동에 직접적으로 미치는 영향을 관찰 할 수 있으며, 기초의 회전거동 및 수평거동의 메커니즘을 이해하기에 적절하다. Gajan 등 (2005)과 Anastasopoulos 등 (2011)은 각각 원심모형실험과 수치해석을 통해 수평반복하중 실험으로 지진 시 얇은 기초의 회전거동을 예측할 수 있다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 근입된 얇은 기초의 회전거동을 평가하기 위해 수평반복하중 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 수평반복하중 실험을 변위제어(displacement control)방식으로 수행하였다. 세장비가 다른 각각의 시스템에는 동일한 변위하중단계를 적용하였다. Housner (1963)의 회전거동 이론에 따라 구조물의 항복변위(δ_R)를 기초크기의 1/2 (0.7m)로 정하고, 구조물 상부에 항복변위의 5%, 10%, 20%, 30%, 50%를 단계별로 5번 총 25번 가하였다([그림 37]). 구조물 상부에 항복변위의 50%변위를 가함으로써 지진 시 시스템이 나타낼 수 있는 극한상태까지 모사하였다. 각각의 변위하중 단계별 속도는 0.14mm/s(항복변위의 5% 변위단계), 0.28mm/s(항복변위의 10% 변위단계), 0.56mm/s(항복변위의 20% 변위단계), 0.84mm/s(항복변위의 30% 변위단계), 1.4mm/s(항복변위의 50% 변위단계)를 가하였으며, 단계별 속도에 따른 반복하중의 주기는 모델 수준으로 50초, 원형 수준으로 1000초로 상대적으로 느린 주기로 결정하였다. 해당 주기는 Anastasopoulos 등 (2012)이 수평반복하중 실험 시 구조물의 관성력이 발생하지 않도록 사용한 주기이다.

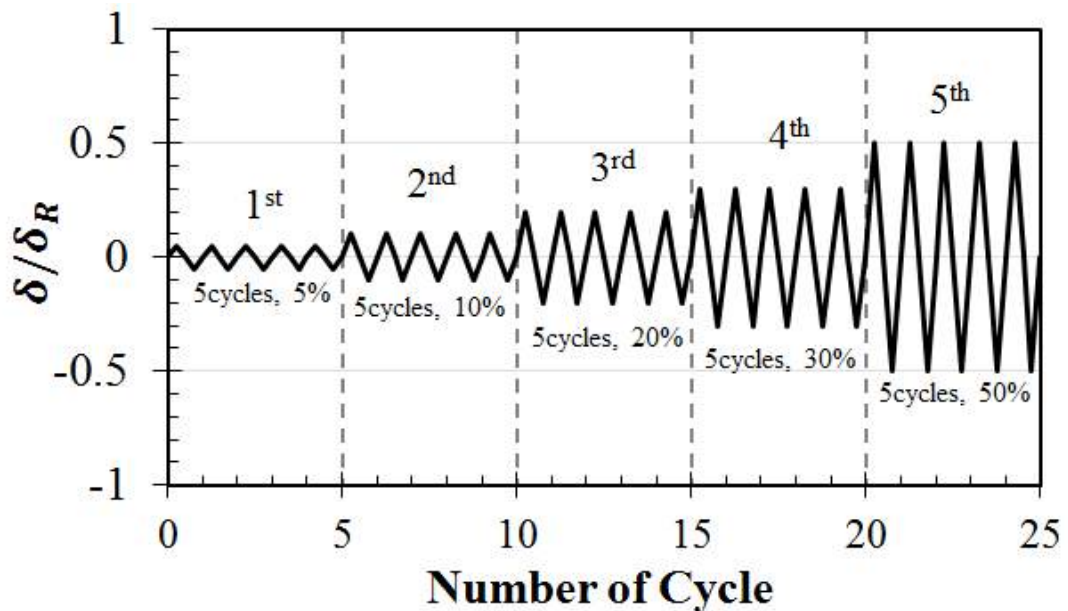


그림 37. 반복하중 횟수에 따른 변위 단계 변화

(라) 원심모형실험 단면 및 계측

원심가속도 20g 수준에서 수행된 실험의 단면 및 센서 구성은 [그림 38]과 같다. 조성된 지반은 기초 크기의 약 2.8배로 모델 수준으로 20cm, 원형 수준으로 4m에 해당하며, 얇은 기초는 해당 기초의 높이인 0.4m만큼 근입되었다. 수평반복하중 재하를 위하여 실험체에 맞는 덮개를 제작하였으며, 액추에이터와 덮개 사이에는 하중 계측계(load cell)를 설치하였다. 하중 계측계를 통해 얻은 데이터는 얇은 기초에 가해지는 모멘트를 계산하는데 이용하였다. 또한 기초의 회전각을 구하기 위하여 구조물의 양 끝단에 변위 센서(LVDT)를 설치하였다. 회전각은 2개의 변위 센서 값의 차($L_1 - L_2$)를 기초의 폭(L)으로 나눠주고, 해당하는 값($(L_1 - L_2)/L$)의 $\tan^{-1}$ 를 취해주는 것으로 구하였다. 그리고 회전거동으로 인한 토압변화를 보기위하여 얇은 기초의 중앙, 끝단, 수평방향에 토압계(earth pressure)를 설치하였다.

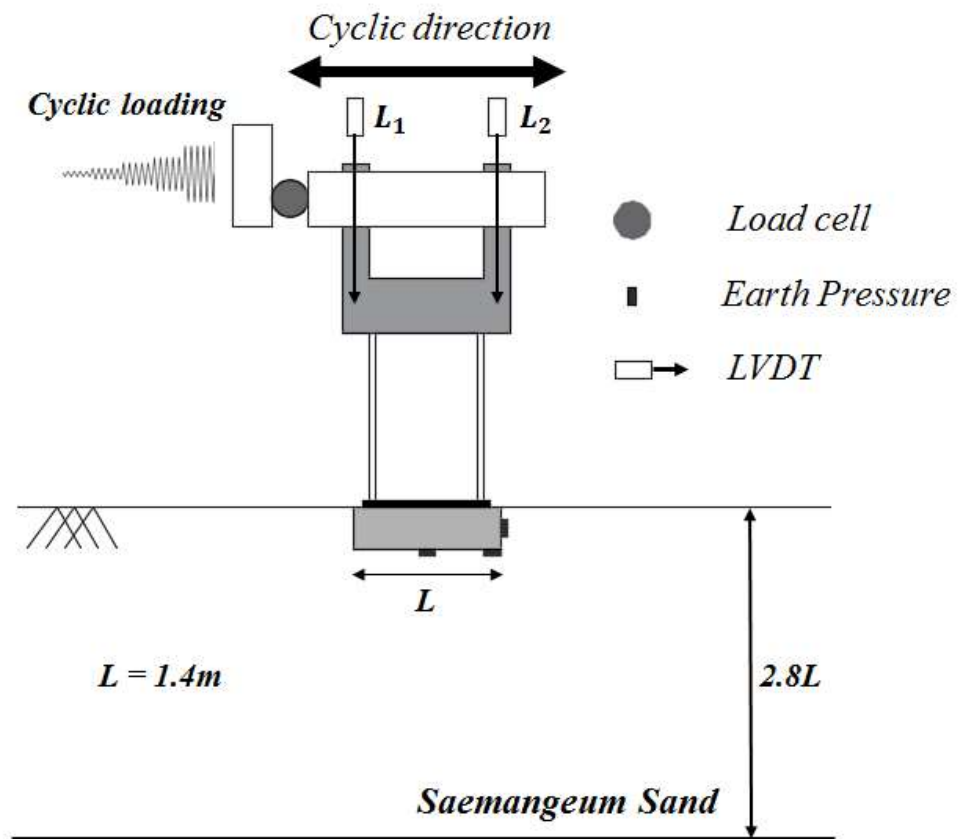
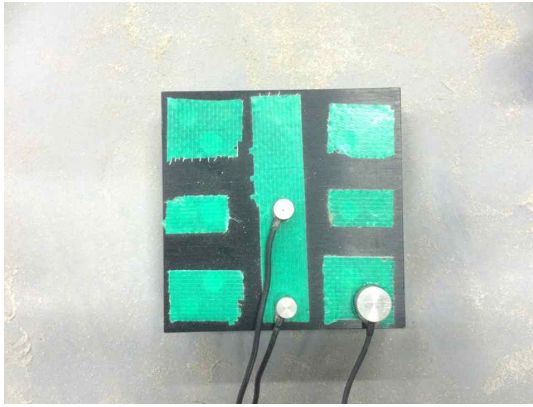


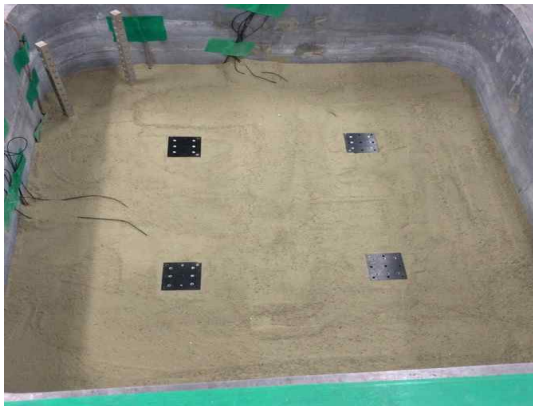
그림 38. 수평반복하중 실험 단면



(a) 기초 하부면에 토압계 설치



(b) 기초 지반 다짐



(c) 기초 설치 및 추가 지반 다짐



(d) 상부 구조물 설치 및 최종 실험 모형

그림 39. 원심모형시험을 위한 모형 제작과정

(2) 얇은 기초의 회전거동 메커니즘 평가

극한 모멘트 지지력은 지진 시 구조물에 가해지는 지진하중과 지반 변형을 결정하는 중요한 요소이다. 또한 극한 모멘트 지지력은 지반의 임계상태에서 발생되며, 지반의 임계상태는 기초의 회전에 의한 지반의 원형현상을 통해 발생한다. 따라서 본 단원에서는 기초의 토압 변화를 통해 기초의 회전에 의한 지반의 원형현상을 기술하였다. 또한 지반에 근입된 얇은 기초의 회전거동과 수평거동의 발현 메커니즘을 관찰하였다.

(가) 지반의 원형 현상 (Soil surface rounding)

[그림 40]은 SDOF2 모델의 토압 변화를 수평반복하중의 1단계([그림 40-(a)], 항복변위의 5%변위하중)와 3단계([그림 40-(b)], 항복변위의 20%변위하중)에 대하여 작성한 그림이다.

① 수평반복하중의 1단계([그림 40-(a)])

(i) A단계

A단계는 첫 변위하중이 작용하여 기초의 끝단과 옆면 토압이 증가된 상태이다. [그림 40-(a)]의 A와 같이 지반의 원형현상이 일어나지 않아 얇은 기초의 중앙부분은 아직 지

반과 접촉해 있다. 따라서 기초의 회전으로 인한 중앙토압 감소가 크지 않음을 알 수 있다.

(ii) B단계

B단계는 기초가 다시 중앙으로 돌아온 상태이다. 따라서 기초 중앙부분의 토압은 약간 증가했음을 알 수 있다. 그러나 A단계에서의 회전으로 인한 하부지반 변형이 기초 끝단 토압의 감소를 야기했음을 알 수 있다.

(iii) C단계

C단계는 A단계의 반대편으로 기초가 회전한 상태이며, B단계보다 중앙토압이 감소했음을 알 수 있다. 그러나 A단계의 중앙토압과 비교해봤을 때 C단계의 중앙토압이 더 큼을 알 수 있다. 이는 [그림 40-(a)]의 A와 C같이 기초가 완전한 대칭으로 회전하지 않고, 반복하중의 첫 방향보다 더 작게 회전했기 때문이다. 즉 기초가 첫 방향으로 회전하면서 지반의 변형을 형성하고, 그로인해 A단계로 갈 때보다 B단계로 돌아올 때 기초의 회전에 필요한 상부의 구조물의 수평변위가 길어진 것이다. 따라서 C단계에서 기초가 A단계만큼 회전하지 못하고 기초의 중앙부분이 지반과 더 강하게 맞닿아 있다. 이 결과는 지표면에 놓인 기초의 수평반복하중 실험결과를 기술하였던 Kokkali 등(2015)과 Panagiotidou 등(2012)의 결과와 일치한다.

(iv) D단계

D단계에서는 A단계에 의해 변형된 하부지반에 의해 기초 끝단 토압이 회전을 시작하기 전의 토압 보다 더 감소했음을 알 수 있다. 또한 변위하중이 증가하지 않아도 하중횟수가 늘어남에 따라 중앙토압의 감소현상이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 지반의 곡률이 증가한다는 것을 말해준다. 그러나 원형현상의 초기단계이기 때문에 이때의 기초의 전도 모멘트는 극한 모멘트 지지력 값보다 작은 값을 갖는다.

② 수평반복하중의 3단계([그림 40-(b)])

(i) E단계

3번째 변위하중 단계의 E단계를 보면 명확하게 기초 하부지반면의 원형현상이 많이 일어났음을 알 수 있다. [그림 40-(b)]의 E처럼 곡률이 증가된 지반 표면으로 인해 한쪽방향으로 회전이 진행됐을 때 기초의 중앙은 지반과 완전하게 떨어지게 되어, 기초 중앙토압은 존재하지 않게 되고 이때의 기초 끝단 토압은 최댓값을 갖게 된다.

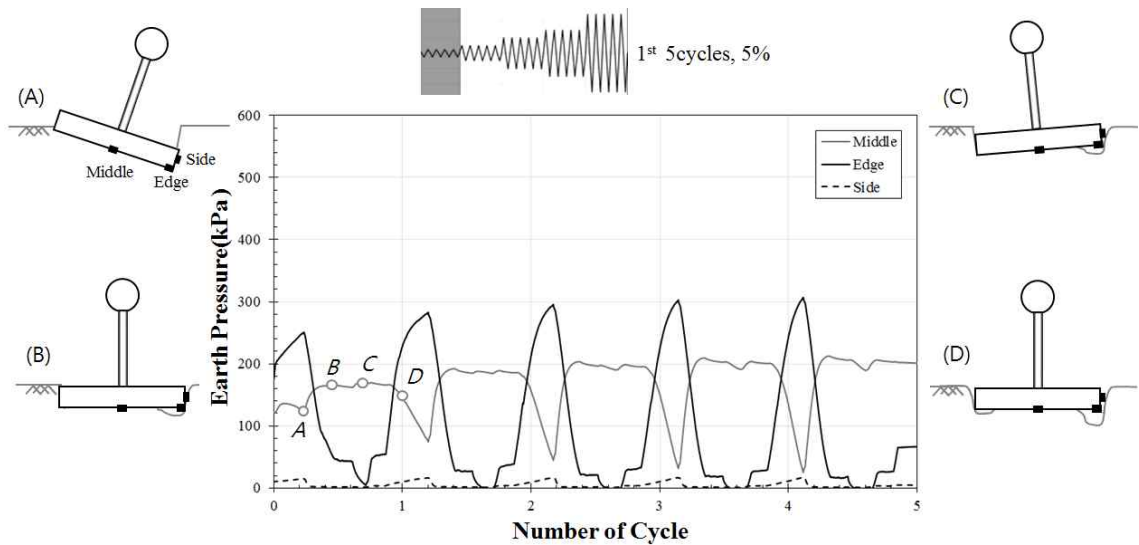
(ii) F단계

F단계에서도 [그림 40-(b)]의 F와 같이 기초가 중앙에 놓였을 때 기초 하부지반면의 원형현상으로 인해 기초 끝단토압이 존재하지 않음을 알 수 있다.

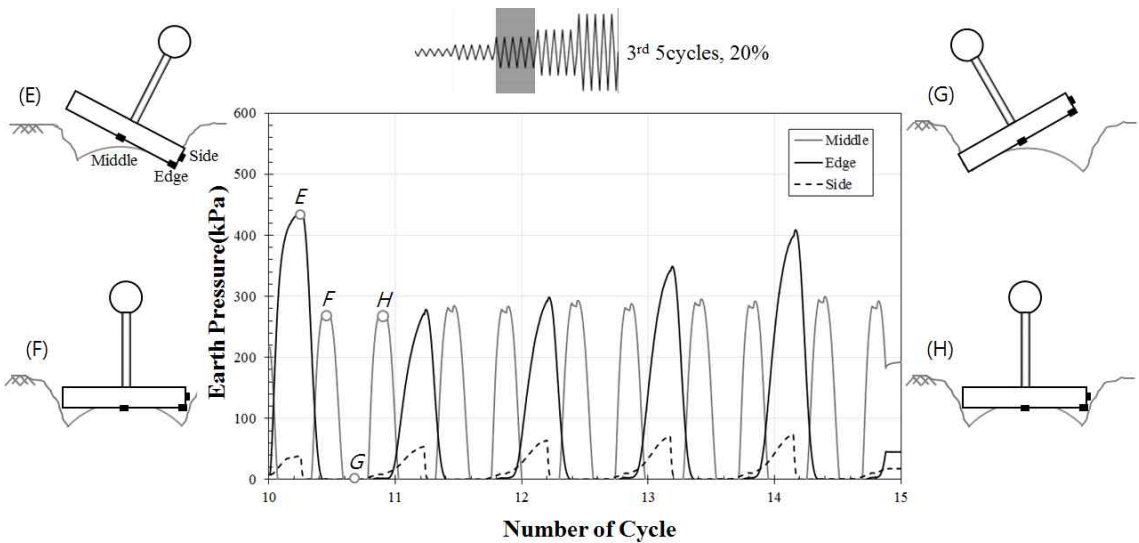
(iii) G, H단계

G단계 역시 E단계와 같이 기초 하부지반면의 원형현상으로 인해 기초 중앙토압이 존재하지 않음을 알 수 있으며, H단계 또한 F단계와 같이 기초 하부지반면의 원형현상으로 기초가 수평상태를 유지하였을 때 기초 끝단 토압이 존재하지 않게 된다.

1)과 2)를 통해 기초 하부지반면의 원형현상은 기초의 회전으로 인해 발생됨을 알 수 있다. 따라서 설계 시 하부지반의 개량을 통해 기초 하부지반면의 원형현상의 정도를 조절할 수 있다면 “회전 기초(Rocking foundation)”설계의 취약점인 지진 시 지반의 영구변형을 줄일 수 있을 것이다.



(a) 1st 5cycles, 5% of δ_R



(b) 3rd 5cycles, 20% of δ_R

그림 40. 반복하중에 따른 얇은 기초의 토압변화 및 원형 현상 (모형: SDOF2)

(나) 얇은 기초의 회전 및 수평거동 메커니즘 평가

[그림 41]은 SDOF2 모델의 토압 변화를 수평반복하중의 1단계([그림 41-(a)], 항복변위의 5%변위하중), 4단계([그림 41-(b)], 항복변위의 30%변위하중) 그리고 5단계([그림 41-(c)], 항복변위의 50%변위하중)에 대하여 작성한 그림이다. 그래프의 점선은 수평토압의 최댓값이 발현되는 위치를 나타낸 것이다.

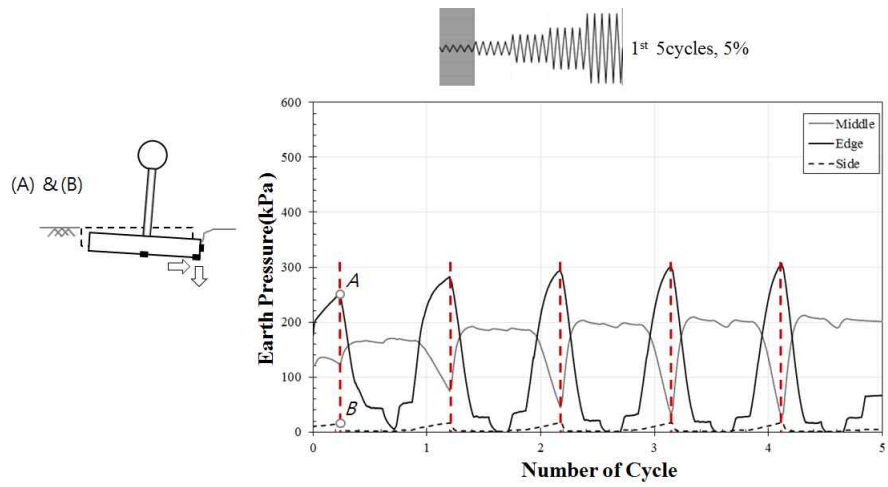
[그림 41-(a)]는 수평반복하중 첫 번째 단계인 항복변위의 5%변위하중이 모델에 가해질 때의 그래프이다. 그래프의 점선을 통해 알 수 있듯이 초기 단계에서는 기초의 수평토압의 최댓값과, 기초 끝단에 놓인 토압의 최댓값이 동시에 발현되는 것을 알 수 있다. 또한 [그림 41-(a)]의 그래프 점 A와 점 B까지 동시에 토압이 증가하는 것을 관찰할 수 있

는데, 이는 기초의 초기 항복거동에서는 기초의 수평거동과 회전거동이 동시에 발생되며 두 거동이 서로 연결(coupling)되어 있음을 말한다.

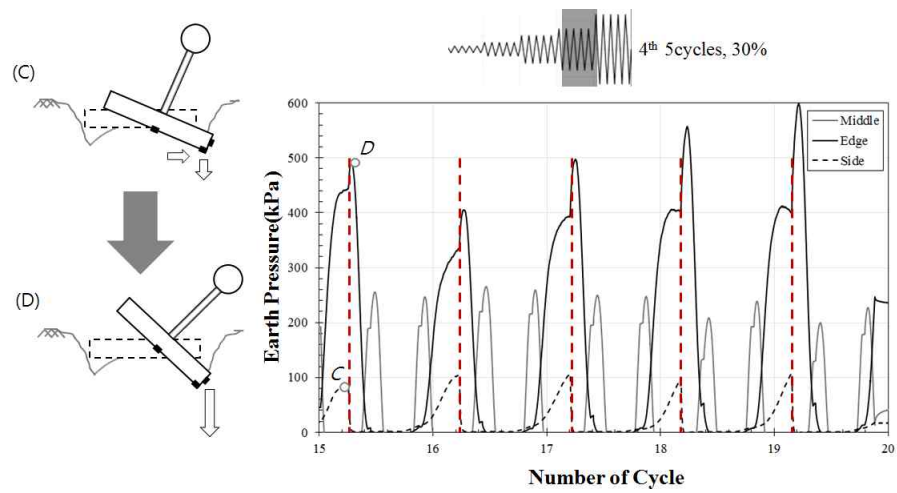
한편 [그림 41-(b)]는 수평반복하중의 4번째 단계인 항복변위의 30%변위하중이 모델에 가해졌을 때의 그래프이다. 수평반복하중의 한 주기(cycle)안에서 기초의 중앙토압의 최대값이 두 번 발생하는 것을 토대로, 수평반복하중 3번째 단계이후에는 지반의 원형현상이 완전히 이루어졌음을 알 수 있다. [그림 41-(b)]의 점 C는 기초의 수평토압의 최대값을 나타낸다. [그림 41-(a)]와 마찬가지로 점 C까지 기초의 수평토압과 기초 끝단에 놓인 토압이 동시에 증가하며, 기초의 회전거동과 수평거동이 서로 연결되어 발생됨을 관찰할 수 있다. 그러나 [그림 41-(a)]와 달리 기초의 수평토압의 최대값을 나타내는 지점에서 기초 끝단토압의 최대값이 발생되지 않았다. 기초 수평토압의 최대값이 발생한 후 수평토압이 감소하면서 기초 끝단에 설치된 토압의 최대값이 발생되었다. 이는 회전거동과 수평거동이 연결되어 발생되다가 수평거동 없이 회전거동만 발생된다는 것을 의미한다. 해당 현상의 발생 원인은 수평거동이 발생되면서 기초의 수평면에 놓인 지반의 경화현상(hardening)을 일으키고, 그로 인해 수평거동이 억제되면서 시스템에 가해진 에너지가 오로지 기초의 회전거동을 야기하기 때문으로 판단된다.

[그림 41-(c)]는 수평반복하중의 마지막 단계인 항복변위의 50%변위하중이 모델에 가해졌을 때의 그래프이다. [그림 41-(a)]와 [그림 41-(b)]의 결과처럼 반복하중의 초기 거동은 유사하다. 기초 끝단에 놓인 토압의 초기 최대값인 점 E까지 기초의 수평토압과 끝단 토압이 같이 증가하는 것이다. 이를 바탕으로 5번째 수평반복하중단계의 초기거동 역시 회전거동과 수평거동이 서로 연결되어 발생함을 관찰할 수 있다. 그러나 점 E이후 점 F까지 기초 끝단에 놓인 토압은 감소하면서 기초의 수평토압은 최대값을 나타낸다. 즉, 회전거동이 억제되고 수평거동이 크게 발생하는 현상이 나타나는 것이다. 이는 지반의 원형현상이 지속되면서 해당 지반의 경화현상(hardening)으로 더 이상 지반이 더 큰 곡률을 형성할 수 없게 되고 그로 인해 기초의 회전거동이 억제되는 것으로 판단된다. 그 이후 점 G까지는 기초의 수평토압이 줄어들면서 기초 끝단에 놓인 토압이 최대값을 갖게 된다. 이러한 현상의 이유는 다음 두 가지의 이유가 복합적으로 작용하기 때문이라고 판단된다. 첫 번째는 점 F에서 발생한 기초의 수평거동으로 인해 미처 지반의 원형현상이 진행되지 못한 지반까지 기초가 거동하여 회전현상을 일으키는 것이다. 두 번째는 [그림 41-(b)]의 설명과 같이 기초의 수평거동의 증가로 인해 수평지반의 반발력이 증가하고 이를 토대로 시스템에 작용한 에너지가 수평거동에서 회전거동을 더 발생시키는 쪽으로 작용했다는 것이다. 또한 반복하중 횟수가 증가함에 따라 기초의 수평토압이 감소하며 사라짐을 볼 수 있다. 이는 수평거동의 증가로 지지력이상의 하중이 수평지반에 가해졌을 때 지반이 견디지 못하고 소성(yielding)변형을 일으키는 것 때문으로 판단된다.

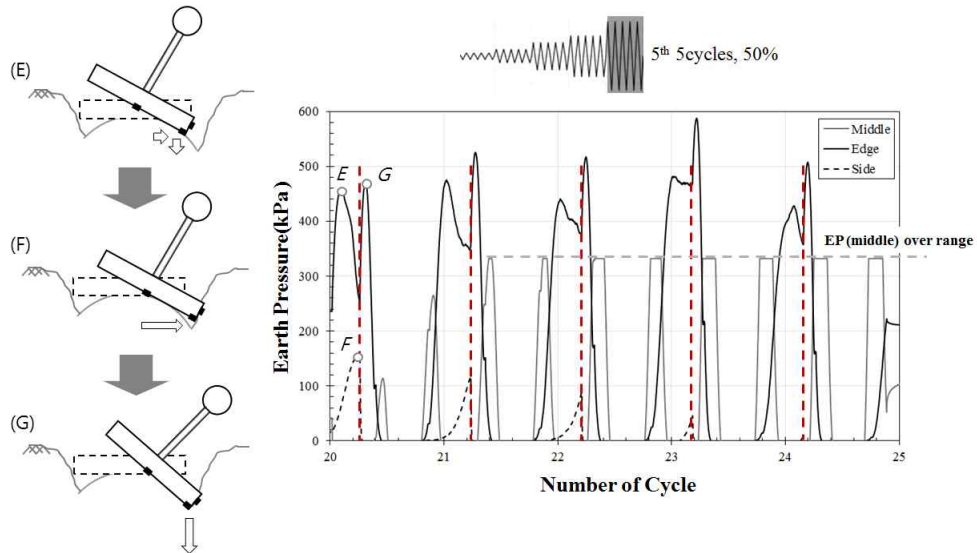
본 단원에서는 기초의 토압변화를 통해 기초의 수평거동과 회전거동은 초기에는 연결(coupling)되어 발생되며, 수평반복하중이 진행될수록 하중크기와 작용된 횟수에 따라 수평거동과 회전거동이 각각 독립적으로 분리(decoupling)되어 발생하는 것을 관찰하였다. 하중단계에 따라 기초의 수평거동과 회전거동이 발생하는 메커니즘은 시스템의 세장비에 관계없이 동일하였다. 이를 바탕으로 수평거동이 우세한 시스템(시스템의 세장비 <1)의 경우 수평거동 억제를 통해 회전거동을 보다 많이 발생시키는 “회전 기초(Rocking foundation)”설계를 할 수 있을 것이다.



(a) 1st 5cycles, 5% of δ_R



(b) 4th 5cycles, 30% of δ_R



(c) 5th 5cycles, 50% of δ_R

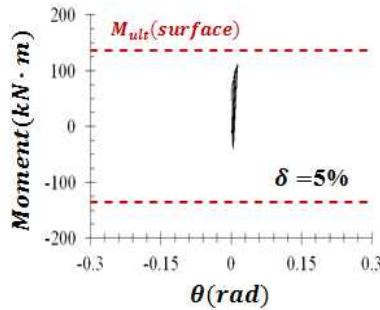
그림 41. 반복하중에 따른 얇은 기초의 토압변화 및 회전, 수평 거동 메커니즘
(모형: SDOF2)

(3) 수평하중단계에 따른 모멘트-회전각 특성

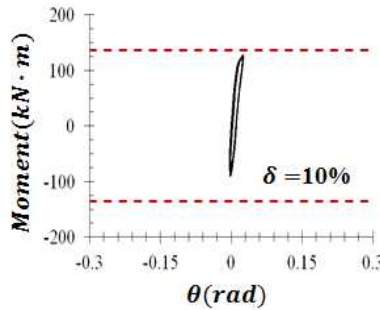
[그림 42]는 SDOF2 모델의 수평반복하중 단계별 기초에 가해지는 전도모멘트를 기초의 회전각에 대해 그래프를 그린 것이다. 그래프에 사용된 수치는 모두 원형모델(20g)에 해당하는 수준으로 환산한 것이다. 식 (6)을 통하여 해당 모델이 지표면에 놓였을 때의 극한 모멘트 지지력을 구하고 이를 빨간 점선으로 도시하였다.

초기 변위하중 단계 (항복변위의 5%변위하중)에서 모멘트-회전각 이력곡선(hysteresis loop)은 시스템의 선형성을 보여준다. 또한 탄성거동에 가까운 거동을 보이며 이로 인해 지반으로 소산되는 에너지 감쇠(damping)가 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 변위하중의 크기가 증가할수록 시스템의 비선형성과 비탄성거동은 커짐을 알 수 있다. 즉, 기초의 회전각이 커짐에 따라 기초의 회전강성(rocking stiffness)이 감소하고 지반으로 소산되는 에너지 감쇠가 커진다는 것이다. 특히 ‘라’단원에서 관찰하였듯이 3번째 변위하중단계를 기점으로 지반의 원형현상이 완전히 이루어지면서 기초의 전도 모멘트는 극한 모멘트 지지력에 도달하게 되고, 그 이후로 비선형성과 에너지 감쇠가 보다 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 지반의 원형현상으로 인해 상부구조물의 에너지가 지반에서 소산되며 이는 “회전 기초(Rocking foundation)”설계기법이 상부구조물의 지진하중을 효과적으로 줄일 수 있음을 말한다.

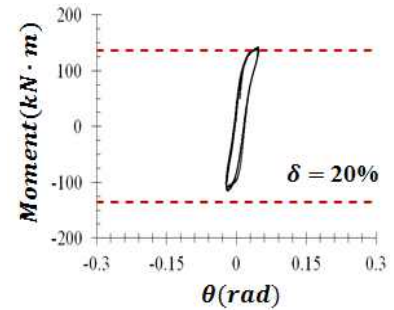
또한 모든 변위하중 단계의 모멘트-회전각 이력곡선에서 기초의 초기거동방향(양의 회전각)으로 더 큰 모멘트 하중이 발생한다. 이는 지반의 원형현상에서 언급하였듯 기초의 극한모멘트 지지력은 수평반복하중의 방향성에도 의존한다는 것을 말해준다.



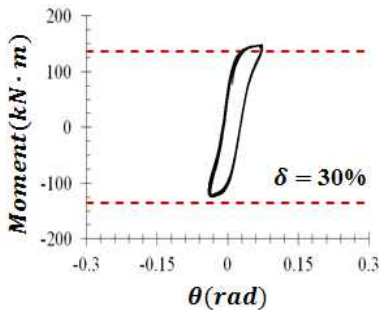
(a) 1st 5cycles, 5% of δ_R



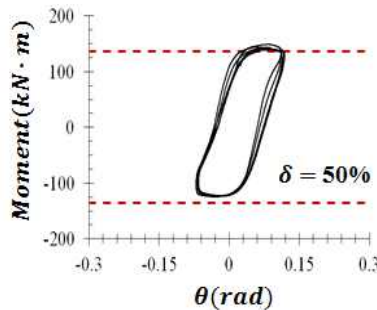
(b) 2nd 5cycles, 10% of δ_R



(c) 3rd 5cycles, 20% of δ_R



(d) 4th 5cycles, 30% of δ_R



(e) 5th 5cycles, 50% of δ_R

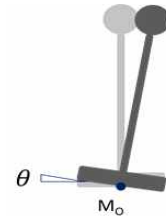


그림 42. 반복하중의 단계별 모멘트-회전각 곡선 (모형: SDOF2)

에서 지표면에 놓인 기초의 극한모멘트 지지력보다 크게 발현되는데, 이는 기초가 수평반복하중의 첫 방향으로 기울기 때문으로 판단된다.

한편 모델에 상관없이 구조물 상부에 똑같은 크기의 변위하중단계를 재하했기 때문에 상대적으로 세장비가 작은 SDOF1이 보다 큰 회전각을 갖는 것을 관찰할 수 있으며, 세장비가 작은 시스템일수록 비대칭한 모멘트-회전각 이력곡선을 보인다. 이는 세장비가 작은 시스템일수록 수평거동이 많이 발생하여 비대칭적인 지반의 원형현상을 넓은 영역에서 만들고, 이로 인해 기초의 기울어짐 현상을 극대화시키기 때문이다.

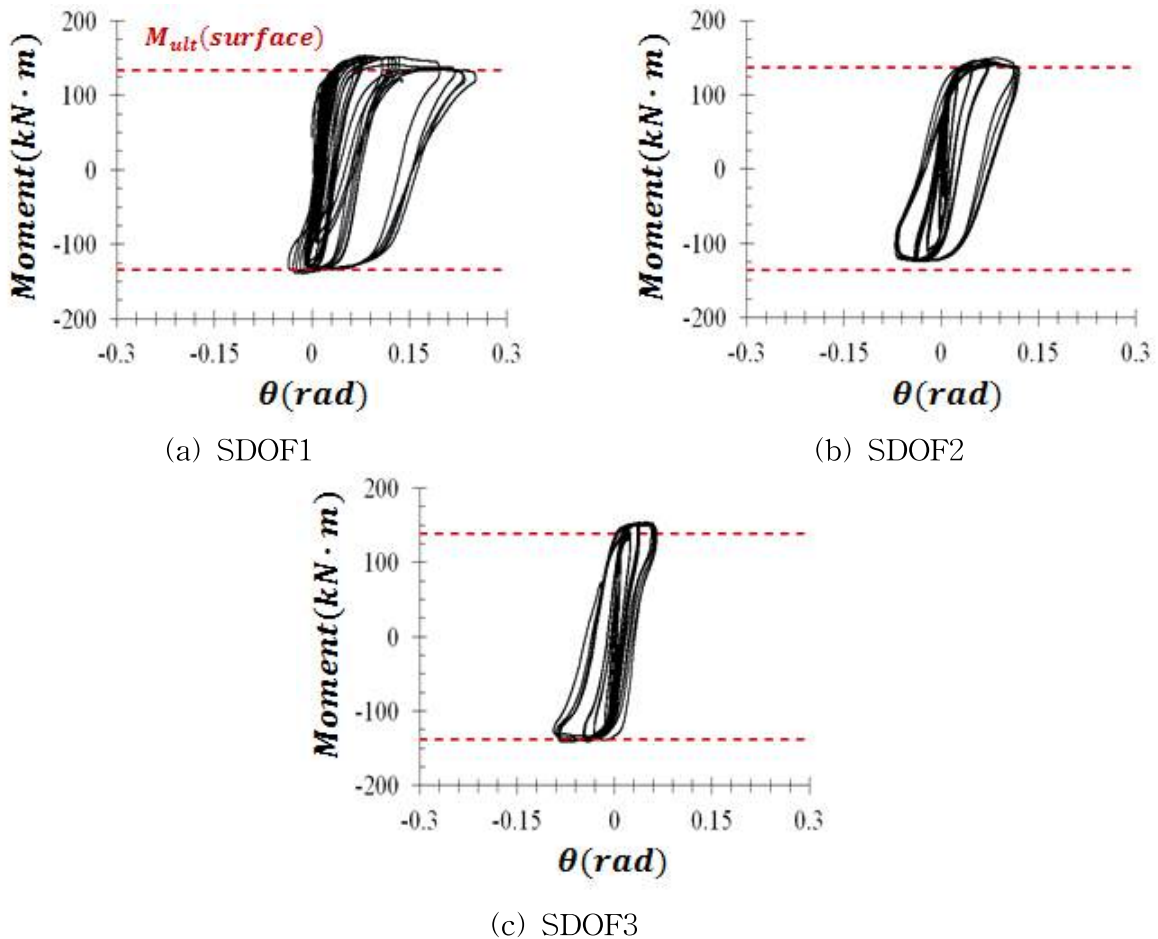


그림 44. 각 구조물 모형에 따른 모멘트-회전각 곡선

(나) 수평토압과 극한 모멘트 지지력 관계

근입된 기초의 극한 모멘트 지지력 증가현상은 수평지반에 의해 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 기초의 수평토압과 모멘트와의 관계를 관찰하였다. [그림 45]는 SDOF1과 SDOF2에 대해 근입된 기초의 모멘트(M)를 지반위에 놓였을 때의 기초의 극한 모멘트지지력($M_{ult(surface)}$)으로 나뉜 값과 수평토압(EP)을 수평반복하중 동안 발생한 최대 수평토압(EP_{max})으로 나뉜 값을 표기한 것이다.

[그림 45]는 정규화(normalization)된 수평 토압의 경향성과 정규화 된 기초의 모멘트의 경향성이 일치함을 보여준다. 또한 수평반복하중이 진행됨에 따라 기초의 모멘트는 증가하고 일정한 값에 수렴하게 되는데 이 값을 근입된 기초의 극한모멘트 지지력이라 볼 수

있다. 한편 20번째 반복하중 이후에는 근입된 기초의 극한모멘트가 수평토압이 감소하자 지표면에 놓인 극한모멘트 지지력과 같아짐을 관찰 할 수 있다. 이를 통해 수평지반에 의한 토압과 마찰력이 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력을 증가시키는 것을 확인할 수 있다.

한편 근입된 기초의 극한 모멘트 지지력 증가현상은 세장비가 상대적으로 작은 SDOF1 모델은 13%, 세장비가 상대적으로 큰 SDOF2는 9%로 세장비가 작은 구조물에서 보다 크게 나타난다. 이는 세장비가 작은 SDOF1 모델에서 수평거동이 더 크게 발생하고 이로 인해 보다 큰 수평지반의 반발력이 발생하기 때문이다.

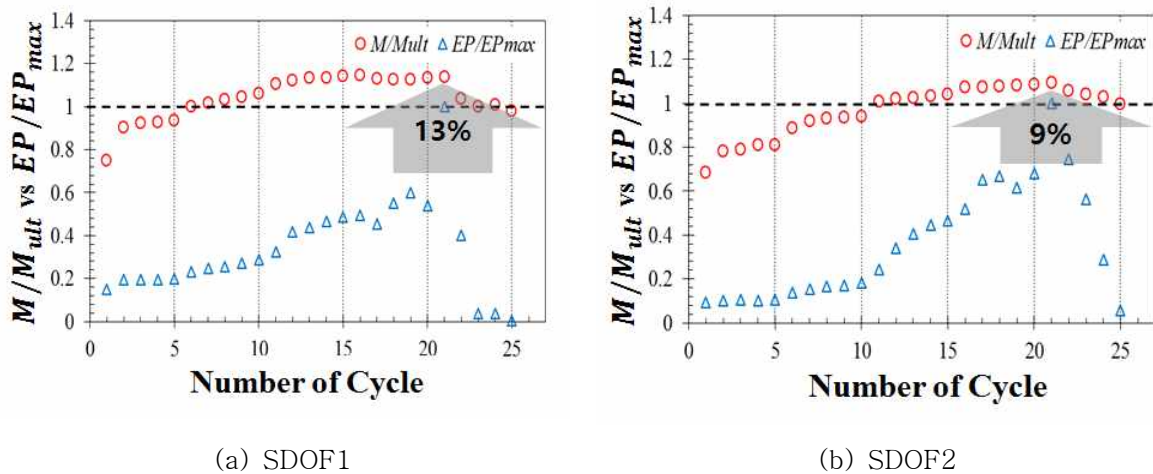


그림 45. 반복하중에 따른 정규화 된 전도모멘트와 정규화 된 기초 옆면 토압

나. 기초 항복거동 메커니즘 분석을 위한 동적 원심모형실험 (지진 하중)

(1) 동적 원심모형실험 모델링

(가) 얇은 기초 모델링

얇은기초 모형은 가로, 세로, 폭이 각각 9cm, 9cm, 3cm인 정사각형 모형으로 제작되었다. 이는 실험이 수행된 원심가속도 50g에 대한 상사비를 적용할 경우 4.5m, 4.5m, 1.5m로 대응되며, 선행 연구 결과들로부터 지진 세기가 약할 때에는 기초의 항복거동이 일어나지 않으며, 강한 지진이 왔을 때에는 항복거동이 유발될 수 있도록 하였다. 이를 통해서 지진 세기에 따라서 지반-기초-구조물 시스템의 거동을 단계적으로 관찰 할 수 있도록 설계하였다.

기초의 지진 시 전도모멘트에 대한 지지력은 기초의 무게가 증가할수록 커지게 된다. 이에 대한 실험적 평가를 위해서 하나는 알루미늄 합금으로 제작하였으며, 다른 하나는 철로 제작하여 기초의 질량을 다르게 제작하였다. 얇은기초의 세원은 [표 8]과 같다.

표 8. 얇은 기초 제원

	Aluminum (FND1)	Steel (FND2)
Length (cm)	9	9
Height (cm)	3	3
Mass (kg)	0.66	1.91
Material	알루미늄	철

(나) 단자유도 구조물 모델링

얇은기초 위에 놓이는 상부 단자유도 구조물은 두 개의 얇은 전단보와 철로 만든 상부 질량으로 구성하여 제작 되었다. 이는 자유장 응답으로부터 지진 하중을 산정하는 응답스펙트럼의 개념과 유사한 조건을 만들어서 지반-기초-구조물 상호작용에 의한 지진하중 변화를 직접적으로 관찰하기 위함이다. 양 전단보의 길이 및 상부 질량을 바꾸어 단자유도 구조물의 고유 주기를 변화 시켰다. 이를 통해서 상부 단자유도 구조물의 지진 시 거동 특성과 고유 주기 변화에 따른 지반-기초-구조물 상호작용의 영향을 평가하고자 하였다.

또한, 실제로 다층 토목 구조물 및 건축 구조물의 지진 시 거동을 평가하기 위해서 다자유도 구조물도 함께 모델링하였다. 다자유도 구조물은 전단보와 철로 만든 단자유도 구조물을 쌓아올리는 형태로 설계하였다. 최종적으로 단자유도 구조물 3개, 다자유도 구조물 2개, 총 5개의 상부 구조물을 제작하여 실험을 수행하였다. [표 9]는 각 구조물의 설계도면이다.

표 9. 상부 구조물 설계 도면

	구조물 종류				
	(a) SDOF1	(a) SDOF2	(a) SDOF3	(a) MDOF1	(a) MDOF2
단면 (mm)					
유효강성 (kN/m)	324.0	96.0	96.0	-	-
유효질량 (kg)	0.345	0.418	0.746	-	-
구조물 고유주기 (sec)	0.324	0.656	0.876	0.306	0.602

(다) 동적 원심모형실험 모델 제작

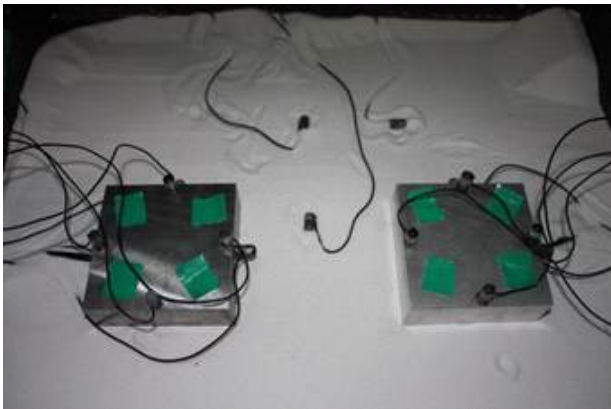
하부 지반을 포함한 원심모형실험 모델 제작과정은 [그림 46]과 같다. 분쇄 공정에 의해 인공적으로 생산한 규사를 낙사하여 균질한 건조 사질토 지반을 조성하였다. 조성된 시료의 상대밀도는 약 80%로 매우 조밀한 지반이다. [그림 46-(a)]와 같이 하부 지반을 낙사를 통해서 조성하고 일정 깊이에 가속도계를 매설하였다. 그리고 미리 계측기를 부착한 얇은기초를 설치하고 기초 주변 표면에 가속도계를 설치하고 얇은기초 상부에 수직침하 계측을 위한 변위계 지지대를 설치하였다. 최종적으로 [그림 46-(e)]와 같이 상부 구조물을 설치하고 동적 원심모형실험을 수행하였다. [그림 47]은 동적 원심모형실험 단면이다.



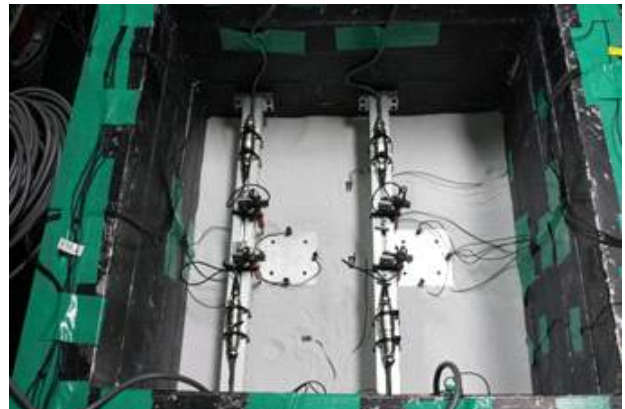
(a) 기초 지반 조성



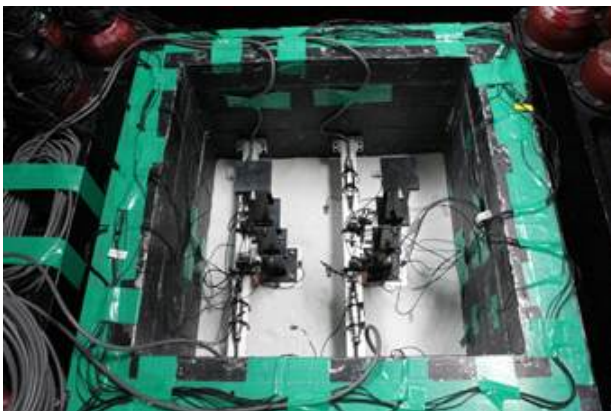
(b) 얇은 기초 설치



(c) 가속도계 설치

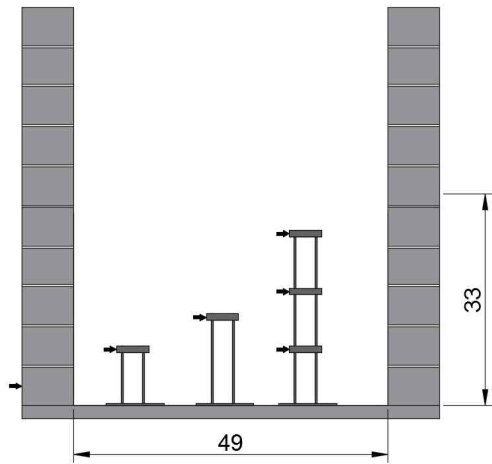


(d) LVDT 프레임 설치

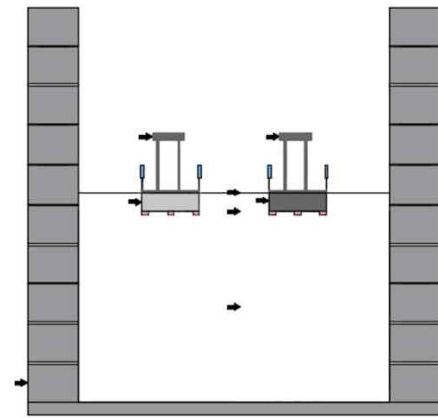


(e) 구조물 설치

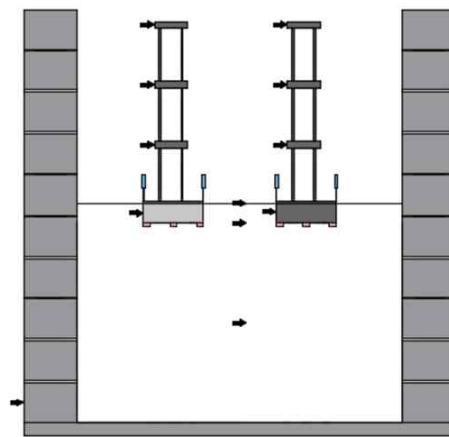
그림 46. 원심모형실험 모델 제작 과정



(a) 고정단 구조물 실험



(a) 단자유도 구조물 실험



(c) 다자유도 구조물 실험

그림 47. 동적원심모형실험 단면

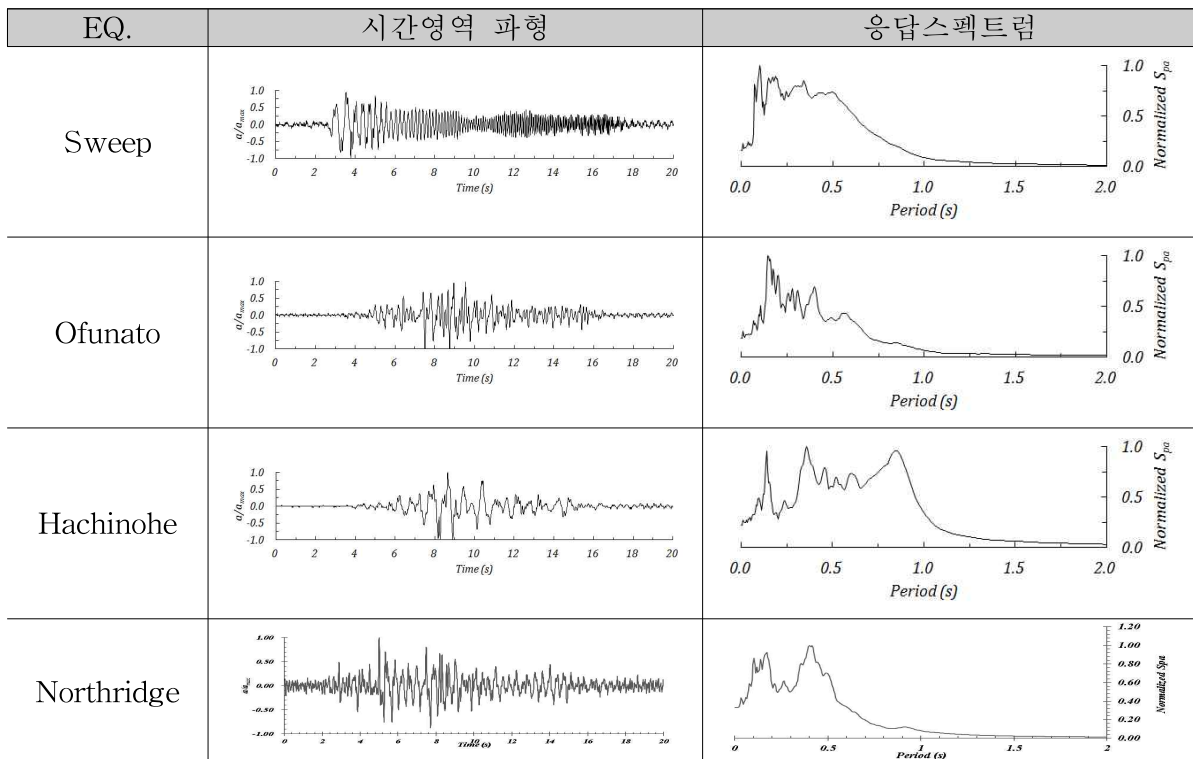
(라) 입력지진파

입력 지진파로는 단주기 특성을 지닌 Ofunato 지진파, 장주기 특성을 지닌 Hachinohe 지진파와 함께 Northridge, Sweep(다양한 주파수 에너지를 지닌 화이트 노이즈 기록)를 사용하였으며 약진에서 강진 순서로 단계별로 가진 하면서 지진파의 주파수 특성, 세기 등이 지반-기초-구조물 상호작용에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 또한 기초의 거동을 보다 면밀히 파악하기 위해서 정현파도 함께 활용하였다.

표 10. 얇은 기초 항복거동 메커니즘 분석을 위한 동적 원심모형실험 구성

Soil Type	기초	실험	No. of Structure
Dense Sand ($D_r=80\%$)	Aluminum (FND1) & Steel (FND2)	단자유도	SDOF 1
			SDOF 2
			SDOF 3
		다자유도	MDOF 1
			MDOF 2

표 11. 입력 지진파의 시간영역 파형 및 응답스펙트럼



(2) 기초 항복거동 메커니즘 분석을 위한 동적 원심모형실험 결과 분석

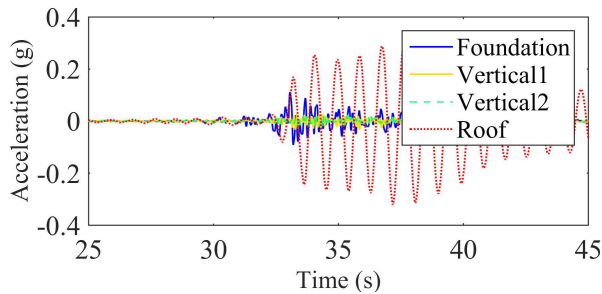
(가) 얇은기초 위 단자유도 구조물의 동적 거동

① 기초 및 구조물 측정 가속도

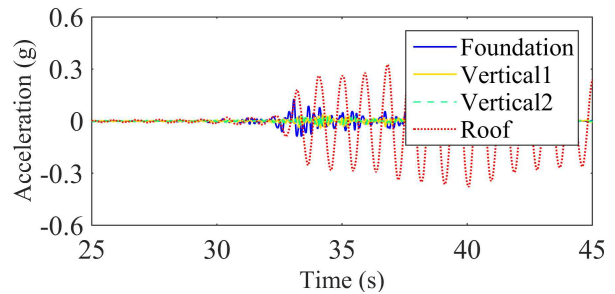
동적 원심모형실험 중 가속도 계측기를 통해서 측정된 기초와 상부 구조물의 가속도 시간 이력을 [그림 48 - 50]에 도시하였다. 다양한 가진 결과 중, 20g 원심가속도 실험에서 단자유도 구조물 2(SDOF 2, $T=0.80s$)에 대해 Hachinohe 지진을 가진한 결과를 기반암 지진 가속도 세기에 따라서 나타내었다.

[그림 48]와 [그림 49]에서는 붉은색 실선으로 표신된 상부 구조물 지붕에서의 거동이 기초의 응답에 비해서 크게 증폭하는 것을 볼 수 있다. 기반암 가속도가 0.07g 근처로 작을 때에는 기초 최대 가속도 0.1g에 비해서 약 3배의 증폭을 보이며, 노란색과 연두색으로 나타나는 기초의 수직 가속도는 거의 반응이 없는 것으로 나타났다. 기반암 가속도가 0.14g로 커지게 되면 구조물 지붕에서의 증폭은 2배 정도 나타나며, 기초의 수직 가속도 성분이 발현되는 것을 확인할 수 있다.

[그림 50]은 상대적으로 지반의 가속도가 0.26g로 가진된 결과로, 이전의 가속도 계측 경향과 다른 현상을 보이고 있다. 구조물 지붕에서의 가속도가 기초의 수평가속도에 비해서 크게 증폭되지 않으며, 중간에서 감폭한 이후에 자유진동이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 기초의 수직 가속도도 크게 발현된다. 이는 기반암 가속도가 커짐에 따라서 기초 및 상부 구조물의 동적 거동이 증가하게 되어서 기초의 회전거동을 크게 유발하게 됨에 따라서 나타나는 현상으로 판단된다.

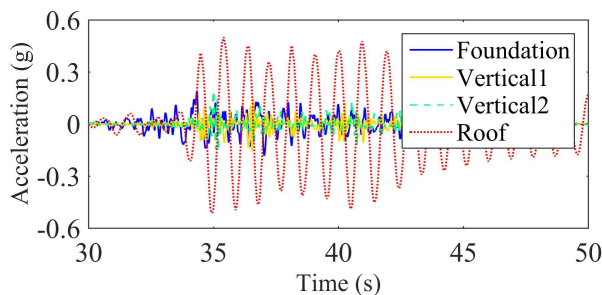


(a) FND1

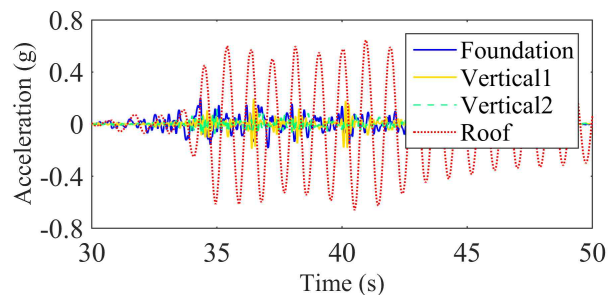


(a) FND2

그림 48. 기초 및 상부구조물 측정가속도 (Hachinohe - No.29 - PGA : 0.0677 g)

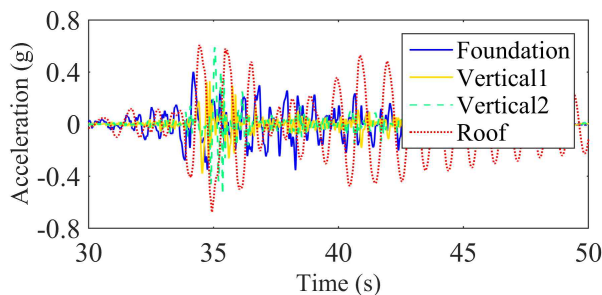


(a) FND1

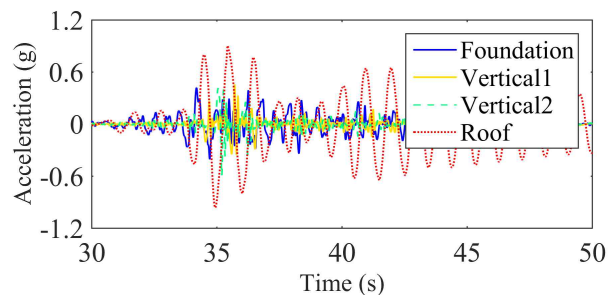


(a) FND2

그림 49. 기초 및 상부구조물 측정가속도 (Hachinohe - No.33 - PGA : 0.1445 g)



(a) FND1



(a) FND2

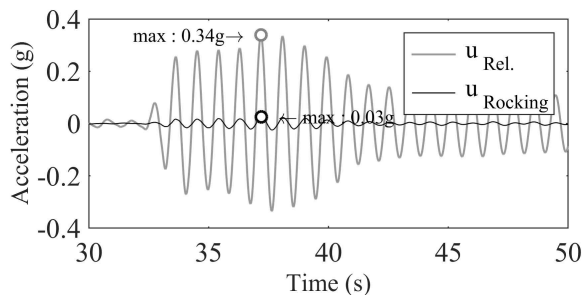
그림 50. 기초 및 상부구조물 측정가속도 (Hachinohe - No.37 - PGA : 0.2640 g)

② 구조물 상대 변위 및 기초 회전 에 의한 구조물 응답

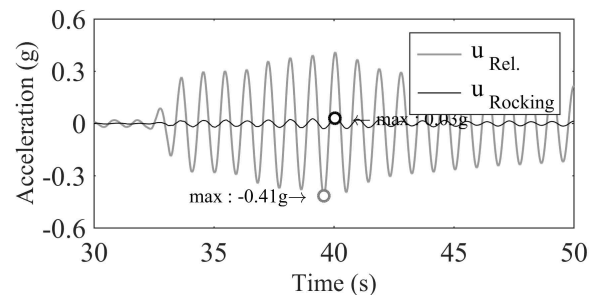
앞절에서 기반암 가속도가 증가함에 따라서 유발되는 기초의 거동과 얇은기초 위 상부 구조물의 지진 시 응답이 달라지는 현상을 확인하였다. 이를 보다 면밀히 파악하기 위해서 기초의 수평 및 회전 거동에 의해서 발생하는 구조물의 응답을 분리하여 [그림 51 - 53]에 도시하였다. 회색으로 표시된 데이터는 구조물의 전체 응답에서 기초의 수평거동을 제거 한 구조물의 상대거동이며, 검은색 실선으로 표시된 데이터는 기초의 회전에 의해서 유발된 구조물의 지진 시 거동이다.

구조물의 기초 대비 상대 거동과 기초 회전에 의한 구조물의 거동의 비는 기반암 가속도가 증가할수록 작아진다. 이는 지진의 세기가 증가할수록 지반-기초-구조물 시스템의 동적 거동의 증가하게 되어 구조물에서 유발되는 전도 모멘트가 증가 할 뿐 아니라, 기초 하부지반의 움직임도 증가하게 되기 때문이다. 구조물의 질량에 따른 지진 시 응답을 보게 되면 기초의 회전거동에 의한 구조물의 응답은 기반암 가속도 0.26g의 강한 지진이 가해졌을 때, 철로 제작된 무거운 얇은 기초(FND2)에서 작게 나타났으며, 반대로 기초

대비 구조물의 상대거동은 알루미늄으로 제작된 가벼운 얇은 기초(FND1)에서 크게 나타났다. 이는 기초의 회전 거동이 크게 발생할 경우, 동일한 상부 구조물이 건설되어 있더라도 지진 시 구조물에서 발현되는 지진 하중은 줄어들 수 있음을 보여주고 있다.

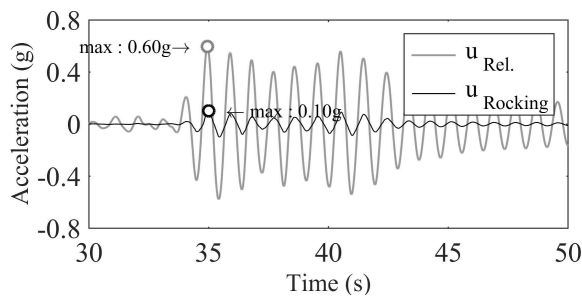


(a) FND1

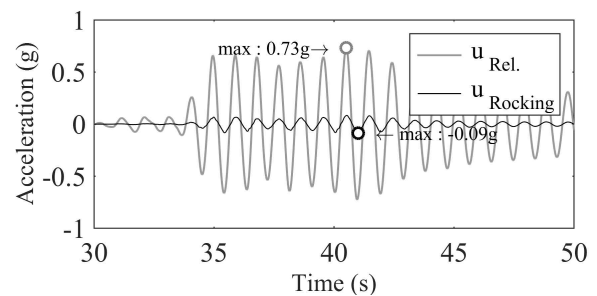


(a) FND2

그림 51. 기초 대비 상대 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.29 - PGA : 0.0677 g)

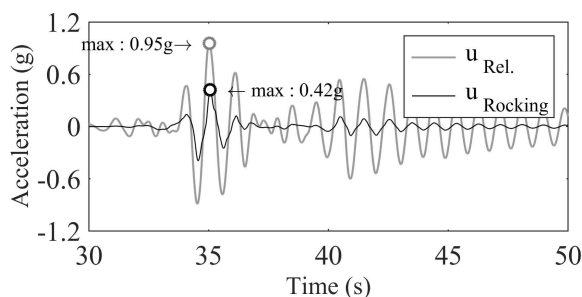


(a) FND1

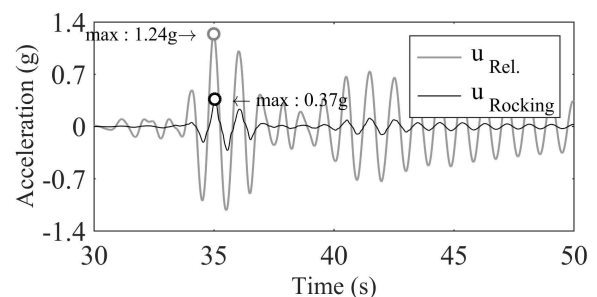


(a) FND2

그림 52. 기초 대비 상대 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.33 - PGA : 0.1445 g)



(a) FND1



(a) FND2

그림 53. 기초 대비 상대 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.37 - PGA : 0.2640 g)

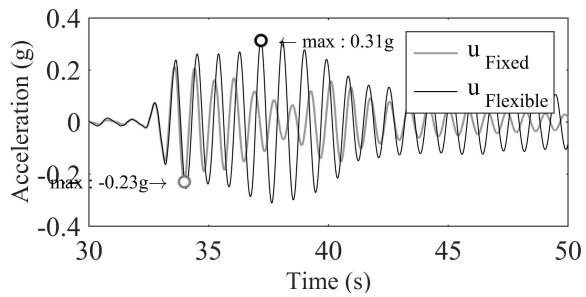
③ 고정단 기초 거동 및 유연한 기초 거동

[그림 54 - 56]은 고정단 기초 거동(Fixed base motion)과 유연한 기초 거동(Flexible base motion)의 대표적 시간이력 결과를 기초의 폭과 기반암 가속도 수준에 따라 도시한 결과이다. 고정단 기초 위에 놓여진 단자유도 구조물의 지진 시 거동은 앞 절에서 설명한 바와 같이 원심모형실험에서 계측된 자유장 지표면 가속도 기록을 입력 운동으로 하여 계산하여 도출하였다. 그리고 유연한 기초 위에 놓여진 상부 단자유도 구조물의 지진 시 거동은 앞 절에서 구해진 상대 거동에서 기초의 회전 거동에 의한 구조물의 응답을 감하여서 구조물 자체의 거동만을 추출하여 구하였다.

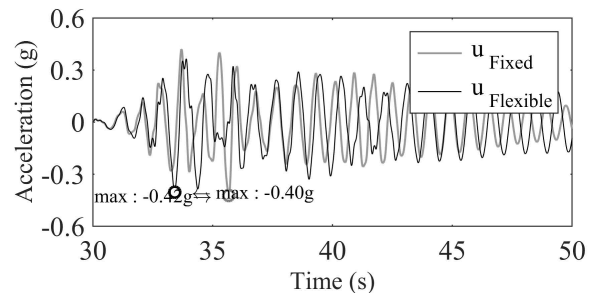
기반암 가속도가 매우 약한 경우에는 얇은기초의 질량에 관계없이 유연한 기초 거동이 고정단 기초 거동과 차이가 0.1g이내로 유사한 크기의 지진 하중이 발현됨을 알 수 있다.

즉 지진의 하중이 작을 때는 지반-기초-구조물 상호작용의 영향이 상부 구조물의 지진 시 거동에 크지 않기 때문에 기초의 질량에 상관없이 유연한 거동이 고정단 거동과 유사한 값을 보여준다.

그러나 기반암 가속도 수준이 커지게 되면 앞절에서 확인한 바와 같이 계측되는 구조물 지붕에서의 증폭이 현저히 감소하게 된다. 따라서 유연한 기초의 거동은 기반암 가속도에 비례해서 증가하지 않는다. 그러나 고정단 기초 거동의 경우에는 가진 세기의 증가에 비례해서 커지게 되어 두 거동 사이의 차이가 증가하게 된다. 그리고 기초의 질량이 큰 기초(FND2)에서 구조물의 유연한 기초 거동이 질량이 작은 기초(FND1)에서보다 크게 나타난다. 이는 기초가 가볍기 때문에 회전에 저항하는 모멘트 능력이 작아서 상부 구조물의 지진 하중 발현을 제한함으로써 나타나는 현상으로 판단된다.



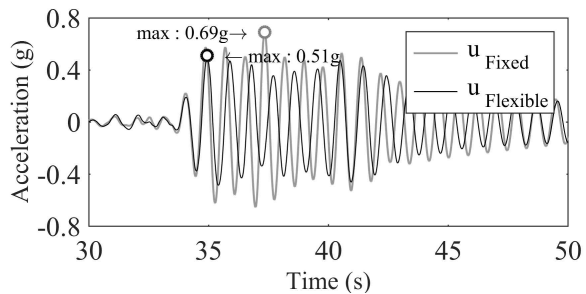
(a) FND1



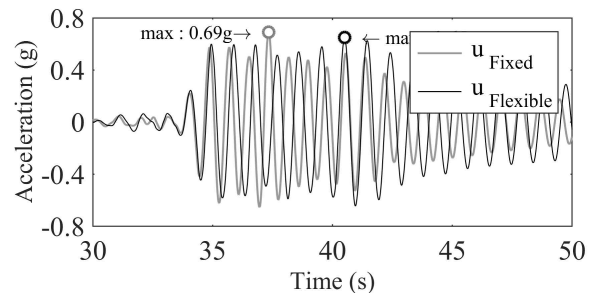
(a) FND2

그림 54. 고정단 기초 거동과 SFSI가 고려된 유연한 기초 거동 비교

(Hachinohe - No.29 - PGA : 0.0677 g)



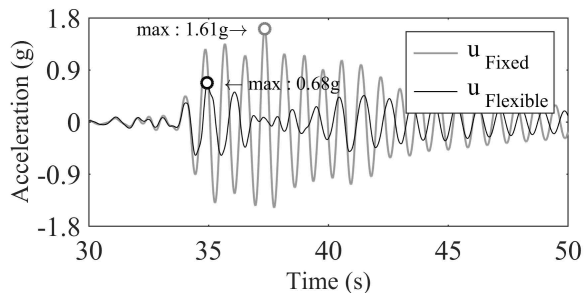
(a) FND1



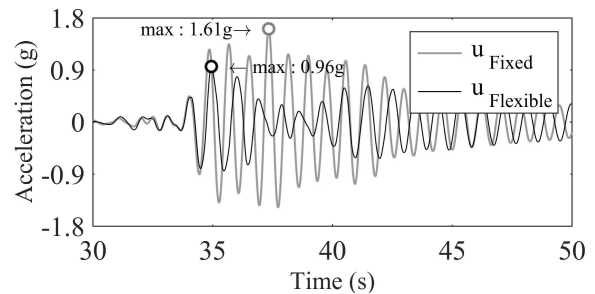
(a) FND2

그림 55. 고정단 기초 거동과 SFSI가 고려된 유연한 기초 거동 비교

(Hachinohe - No.33 - PGA : 0.1445 g)



(a) FND1



(a) FND2

그림 56. 고정단 기초 거동과 SFSI가 고려된 유연한 기초 거동 비교

(Hachinohe - No.37 - PGA : 0.2640 g)

다양한 지진파와 지진 세기에 따른 고정단 기초 거동과 유연한 기초거동을 비교하기 위해서 시간이력의 최대 절댓값을 [그림 57]과 같이 도시하였다. 전반적으로 지진하중이 작을 때는 1:1 선을 따라서 움직이다가 지진하중이 커지면 일정한 값으로 수렴하는 현상을 나타낸다. 이 때, 수렴하는 값은 무거운 얇은 기초(FND2)가 가벼운 얇은 기초(FND1)보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 현행 설계 기준과 같이 고정단 기초로 설계할 경우에는 매우 강한 지진에 대해서 과다하게 상부 구조물의 지진하중을 산정할 수 있으며, 가능한 기초의 무게를 줄이는 것이 내진 설계에 효과적인 것을 알 수 있다.

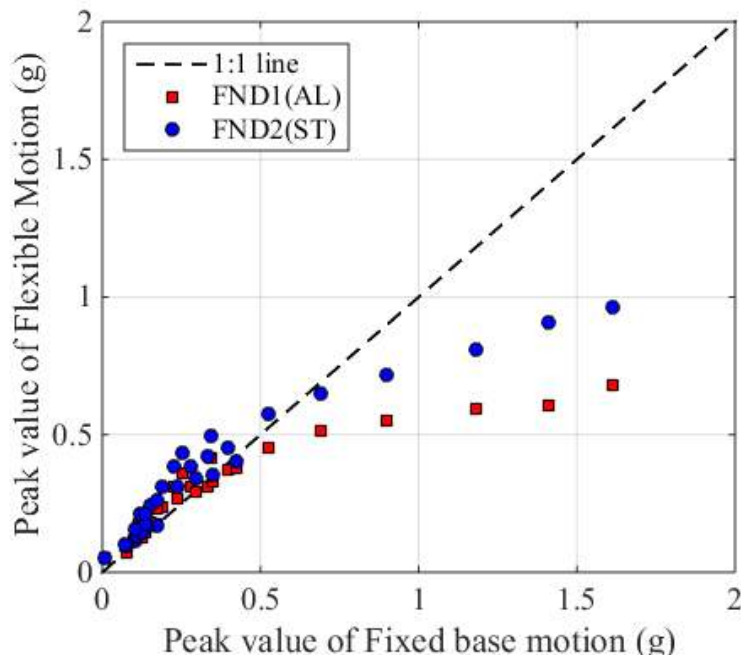
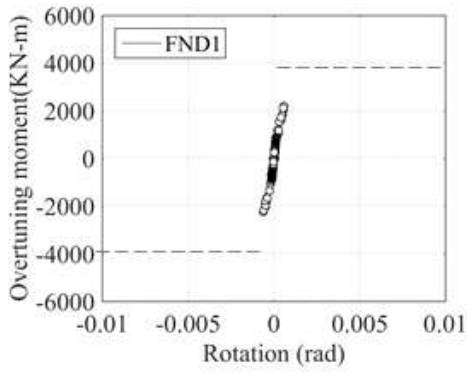


그림 57. 고정단 기초 거동과 SFSI가 고려된 유연한 기초 거동 최대값 비교

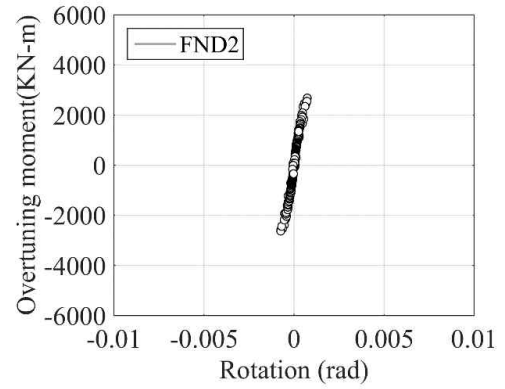
④ 기초 회전각과 상부 구조물의 전도모멘트

지진 하중이 지반-기초-구조물 시스템에 전달 되게 되면 상부 구조물의 유발되고 이로 인해서 기초 저면 중심부에 전도 모멘트가 발생하게 된다. [그림 58 - 60]은 얇은 기초 저면에서 지진 시 유발되는 전도 모멘트와 기초의 회전 각 사이의 관계를 보여 주고 있다. 이를 통해서 기초-구조물 시스템의 거동 특성 및 항복 거동의 유무를 더욱 엄밀하게 판단할 수 있다.

지진하중이 매우 작을 때(기반암 가속도 : 약 0.06g)는 두 기초에서 무게에 상관없이 이력곡선은 모두 선형 거동을 보이며, 이력곡선의 내부 영역도 매우 좁게 나타나고 있다. 그러나 입력 지진하중이 증가할수록 유발되는 모멘트는 증가하지만 회전각도 증가하여 이력곡선의 기울기가 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 또한 [그림 60]과 같이 매우 큰 지진하중에서는 이력곡선이 옆으로 퍼지면 내부에 넓은 영역이 나타난다. 이는 기초의 회전거동에 의해서 시스템의 에너지가 소산되는 감쇠비를 나타낼 수 있는데, 지진하중이 커질수록 기초의 회전 각과 함께 에너지 소산 비율이 증가함을 알 수 있다. 즉, 강한 지진이 발생하게 되면 기초의 회전에 의해서 전체 시스템의 지진 에너지가 소산되므로 현행 설계에서 계산되는 지진하중보다 현저히 작은 양의 지진 하중이 시스템에서 발현될 수 있다고 판단된다.

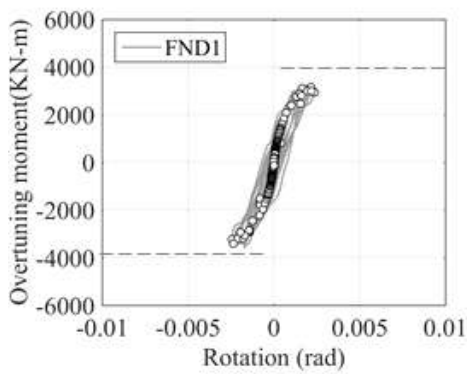


(a) FND1

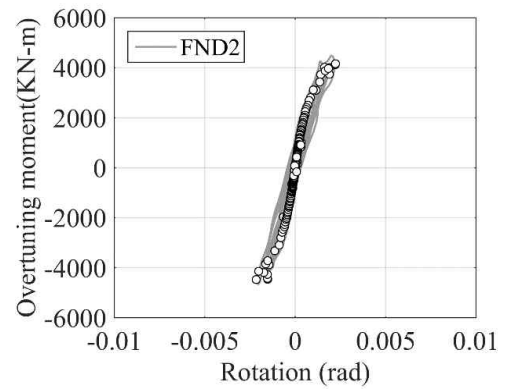


(a) FND2

그림 58. 기초 회전 각과 전도 모멘트 관계 (Hachinohe - No.29 - PGA : 0.0677 g)

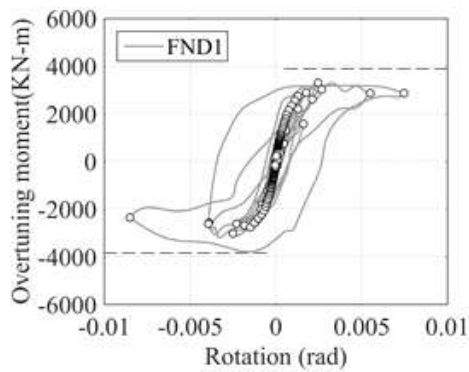


(a) FND1

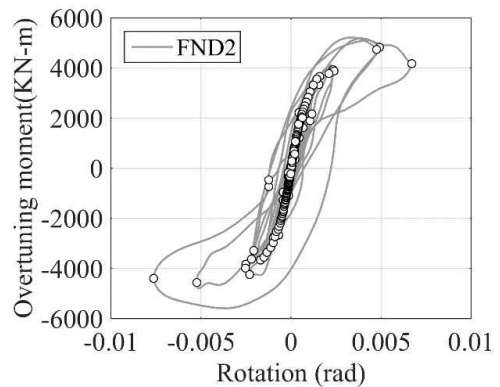


(a) FND2

그림 59. 기초 회전 각과 전도 모멘트 관계 (Hachinohe - No.33 - PGA : 0.1445 g)



(a) FND1



(a) FND2

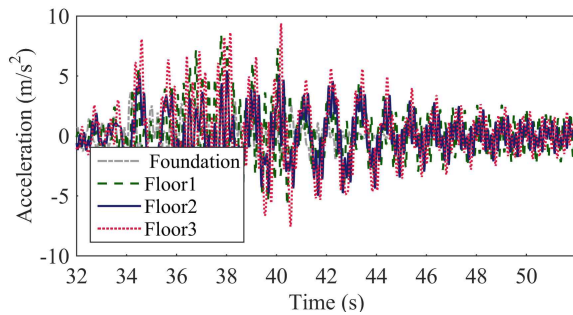
그림 60. 기초 회전 각과 전도 모멘트 관계 (Hachinohe - No.37 - PGA : 0.2640 g)

(나) 얇은기초 위 다자유도 구조물의 동적 거동

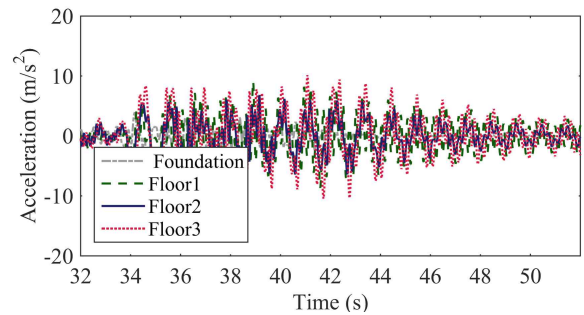
① 구조물 측정 가속도

다자유도 구조물의 응답은 단자유도 구조물의 응답에 비해서 복잡한 형태로 나타나게 된다. [그림 61]는 구조물의 층별 가속도 측정기록의 대표적인 결과이다(MDOF2, Hachinohe - No.31 - PGA : 0.2692 g). 최상층에서 가장 큰 가속도가 발현되는 것을 확

인할 수 있다. [그림 62 - 64]는 지반층을 포함한 위치별 최대 가속도 주상도로, 단자유도 구조물과 마찬가지로 무거운 얇은 기초 위에서의 다자유도 구조물 지진하중이 가벼운 얇은 기초 위에서보다 전반적으로 크게 나타난다. 이는 기초의 무게가 무거워 짐에 따라서 움직임에 대한 저항력이 높아지게 되고 고정단 조건과 유사해 지기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 그러나 지진하중의 크기에 따른 가속도 이력 및 최대 값의 변화 추이는 특별히 나타나지 않는 것으로 나타났다.



(a) FND1



(a) FND2

그림 61. 구조물 층별 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.31 - PGA : 0.2692 g)

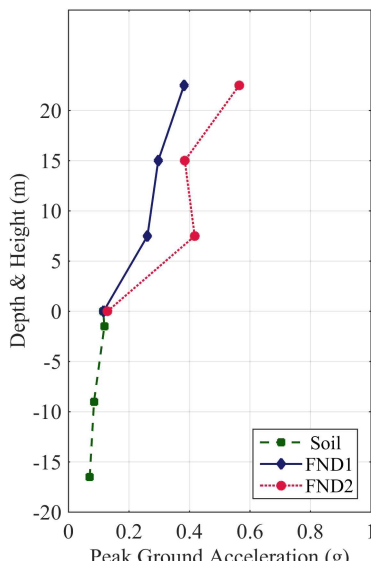


그림 62. 깊이별 최대 가속도 (Hachinohe - No.23 - PGA : 0.0693 g)

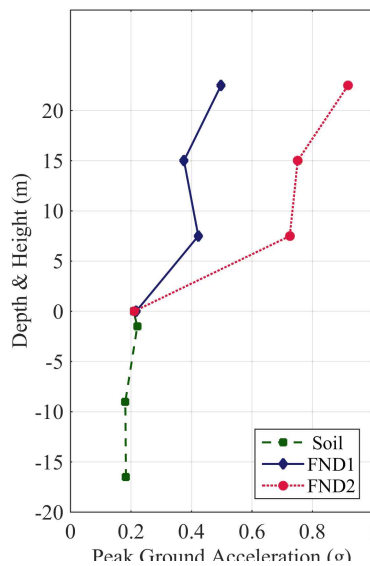


그림 63. 깊이별 최대 가속도 (Hachinohe - No.27 - PGA : 0.1493 g)

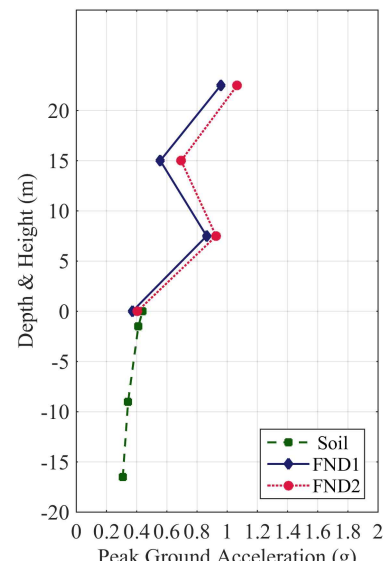
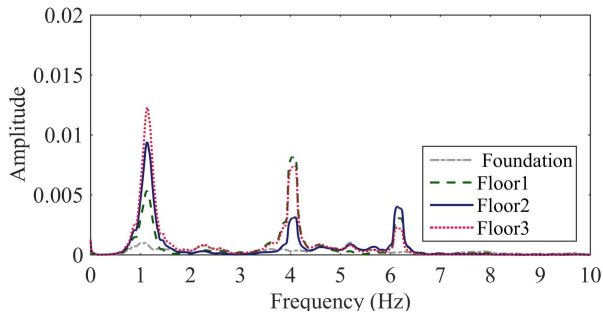


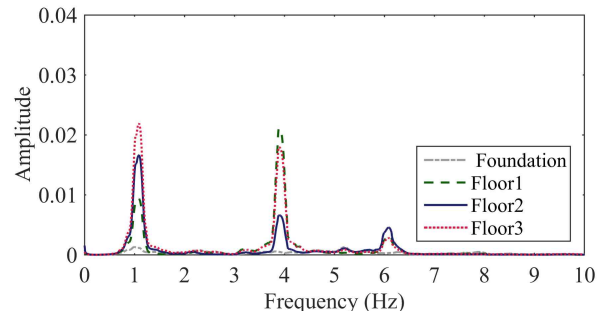
그림 64. 깊이별 최대 가속도 (Hachinohe - No.31 - PGA : 0.2692 g)

② 구조물 측정 가속도 주파수 영역 분석

다자유도 구조물에서 측정된 가속도 시간이력을 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transfom, FFT)를 이용하여서 주파수 영역 데이터로 변환하여 지진 시 구조물 응답의 주파수 특성을 분석하였다. [그림 65 - 66]은 층별 가속도에 대한 FFT 결과를 나타낸다. 실험에서 활용된 다자유도 구조물은 단자유도 구조물이 3층으로 쌓여져 있는 구조물로 지진하중의 크기와 얇은 기초 무게에 관계없이 3개의 주파수(1, 4, 6 Hz)에서 큰 응답을 보이고 있다. 이는 구조물의 각 모드에 따른 진동수를 나타내는 것으로 복잡한 거동으로 수치해석에 어려움이 있는 다자유도 구조물에 대한 지진 거동 연구에서도 원심모형실험이 큰 장점을 가지고 있는 것을 보여주고 있다.

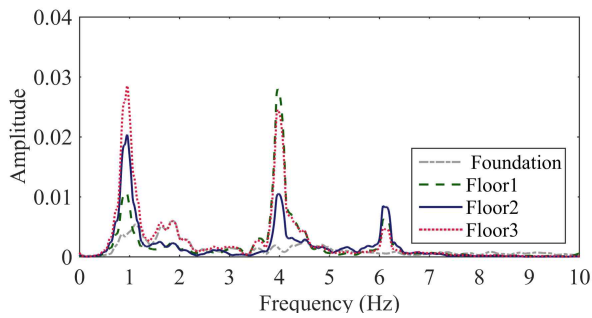


(a) FND1

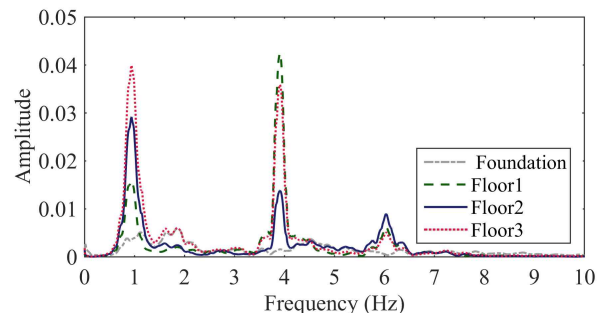


(a) FND2

그림 65. 구조물 층별 가속도 FFT 결과 (Hachinohe - No.23 - PGA : 0.0693 g)



(a) FND1



(a) FND2

그림 66. 구조물 층별 가속도 FFT 결과 (Hachinohe - No.31 - PGA : 0.2692 g)

다. 소 결

“원심모형실험을 이용한 기초 항복거동 및 에너지소산 메커니즘 규명” 연구를 수행한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

● 기초의 회전이 진행됨에 따라 지반면이 둥글게 변화하는 원형현상(soil surface rounding)이 나타나며, 이로 인해 임계상태에서 기초의 최대모멘트가 극한 모멘트 지지력과 같아지는 현상을 확인.

● 기초 측면 지반의 토압과 마찰력에 의해 근입된 기초는 지표면에 놓인 기초보다 10%정도 큰 극한 모멘트 지지력을 가지며, 향후 기초의 회전거동을 이용한 내진설계 시, 기초의 근입조건을 고려한 극한 모멘트 지지력을 바탕으로 상부 구조물의 지진하중을 결정하는 것이 합리적이라고 판단됨.

● 수평반복하중 실험을 통해서 기초의 회전각이 작을 때는 기초는 탄성거동에 가까운 거동을 보이며, 회전각이 커질수록 시스템의 비선형성과 에너지 감쇠가 커짐을 확인. 동적 원심모형실험을 통해서 기초의 회전각과 상부구조물의 전도 모멘트 관계로부터 큰 지진 하중이 가해졌을 때, 지반-기초 면의 항복거동으로 시스템의 큰 에너지 소산 확인.

● 얇은 기초의 회전 운동은 하부지반의 항복 거동을 유발하여 상부구조물의 지진 하중 저감시키며, 지진 하중의 세기, 기초의 안정성 및 구조물의 전도 모멘트 등을 바탕으로 에너지 소산량을 예측할 수 있을 것으로 판단됨.

2. 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 시 영향 평가

가. 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 시 영향 평가 (선단지지 말뚝)

(1) 원심모형실험 모델링

(가) 말뚝 기초 모델링

실험에 사용된 모형 말뚝은 아파트 및 국내 건설 현장에서 널리 사용되고 있는 PHC 500 (외경 500mm) 말뚝에 상사비를 적용하여 설계하였다. 외경 10mm, 두께 1mm의 알루미늄판으로 제작하였으며, 모형말뚝의 제원과 도면은 [표 12]과 [그림 67]에 정리하였다. 말뚝 직경은 지반 조성에 사용된 규사 평균입경(D50)의 46배로 말뚝 직경이 평균 입경(D50)의 35배 이상이 되면 원심모형실험에서 입자 크기가 말뚝에 미치는 영향이 없다는 Ovesen(1979)의 연구 결과를 만족시켰다. 말뚝 캡은 앞 장에서 수행된 얇은 기초 실험 결과와 비교를 위해서 알루미늄 얇은 기초와 동일한 크기와 재질로 제작되었다.(가로 : 9cm, 세로 : 9cm, 깊이 : 3cm)

표 12. PHC 500, 3×3 배열의 말뚝에 대한 실험 모델링 (50g 시험)

	원형	축소 모형
직경(mm)	500	10
두께(mm)	80	0.6
재료	콘크리트	알루미늄
강성(kgf/cm ²)	350000	700000
근입깊이(m)	15	0.3
말뚝 간격(m)	2.5D = 1.25m	0.0025
상부 판의 크기(m)	5 × 5	0.1 × 0.1

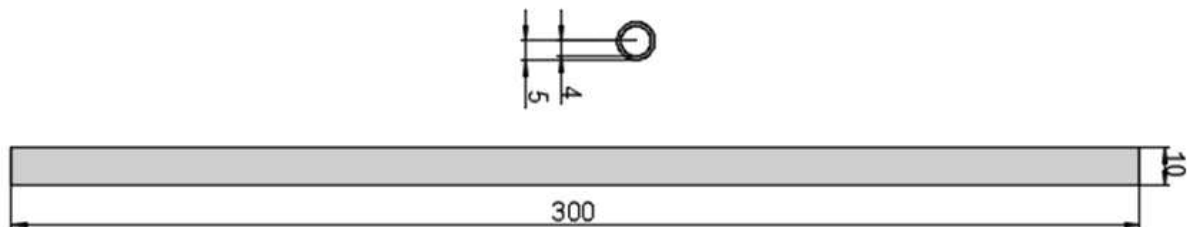


그림 67. 말뚝 기초 설계 도면

말뚝 기초의 경우, 상부 말뚝 기초판의 문힘 깊이에 따라서 기초판에서의 지진 하중 및 시스템 주기가 상이하게 나타나며, 기초판과 말뚝 사이를 연결 하지 않고 자갈층을 두면 기초판의 움직임에 의한 지진하중 격리효과를 유발할 수 있다. 이에 본 절에서는 말뚝이 지지층까지 근입되었을 때 말뚝과 기초판의 결합 유무에 따른 평가를 위해서 말뚝기초 (결합 말뚝기초: FND1, 분리 말뚝기초: FND2)를 각각 2가지 형태로 나누어 실험을 수행하였다. 말뚝기초가 지지층까지 근입되지 않았을 경우 말뚝-기초판 결합 유무와 사이 매질에 따른 영향 평가는 다음절에서 다루도록 한다.

표 13. 말뚝 기초 결합 형태에 따른 지진 하중 평가 동적 원심모형실험

Soil Type	기초	실험	No. of Structure
Dense Sand (Dr=80%)	Connected (FND1) & Disconnected (FND2)	단자유도	SDOF 1
			SDOF 2
			SDOF 3
		다자유도	MDOF 1
			MDOF 2

(나) 말뚝 기초에 대한 동적 원심모형실험 모델링

말뚝 기초 실험을 위한 전체적인 모델 제작 과정은 [그림 68]와 같다. 말뚝 기초 지진 조건은 얇은 기반암 심도에서 설치되는 국내 건설 현장 조건을 최대한 반영하기 위하여 말뚝을 암반에 고정 시키는 선단지지 조건으로 모사하였다. 이를 위해서 [그림 68-(a)]와 같이 말뚝을 하부 지반 조성 전에 모형 박스 바닥에 체결시켰다. 이후 얇은기초 실험과 동일하게 인공 규사를 균일하게 낙사하여 약 80%의 조밀한 건조 사질토 지반을 조성하였다. [그림 68-(c)]와 [그림 68-(d)]는 결합 말뚝과 분리 말뚝의 말뚝 캡 설치면 이음부를 촬영한 사진이다. 결합 말뚝의 경우에는 말뚝 캡과 말뚝을 볼트 체결로 연결하였고, 분리 말뚝의 경우에는 체결없이 말뚝 캡을 말뚝위에 올려 놓는 형태로 설치되었다. 그리고 말뚝 캡을 설치하고, 말뚝 캡이 문힐 수 있도록 추가적으로 낙사를 수행한 후에 구조물 및 추가적인 센서 설치를 통하여 모델 제작을 완성하였다.

기초 위에 놓이는 상부 구조물은 [그림 47]에서 설명한바와 같이 단자유도 구조물 3개, 다자유도 구조물 2개에 대해서 실험을 수행하였다. 이 때 지진파는 장주기 성분이 많은 Hachinohe, 단주기 성분이 많은 Ofunato 등의 실지진파와 정현파를 약한 세기부터 강한 세기까지 단계별로 기반암 가속도를 증가시키면서 입력하였다.

[그림 69]은 말뚝 기초에 대한 동적 원심모형실험의 단면으로 동적 거동 측정을 위해서 가속도계, 토압계, 변위계 등을 설치하였다.



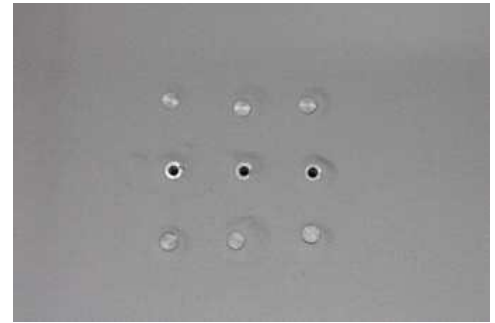
(a) 말뚝 기초 설치



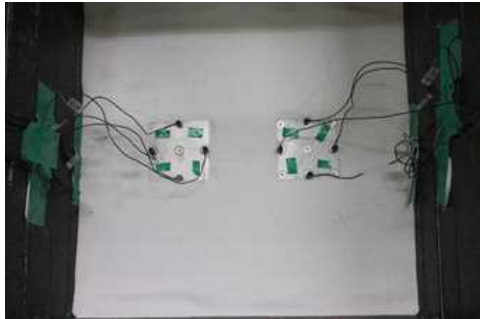
(b) 하부 지반 조성



(c) 결합 말뚝기초 표면

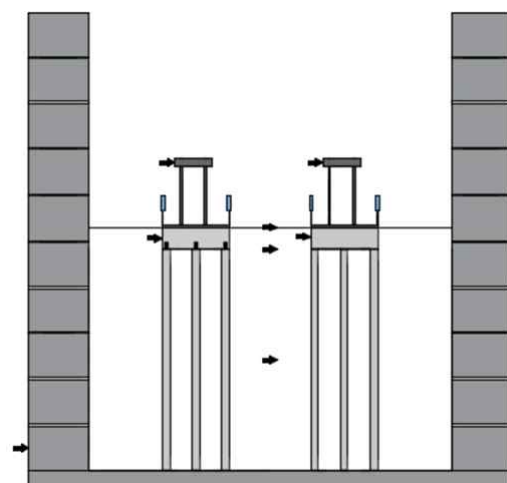


(d) 분리 말뚝기초 표면

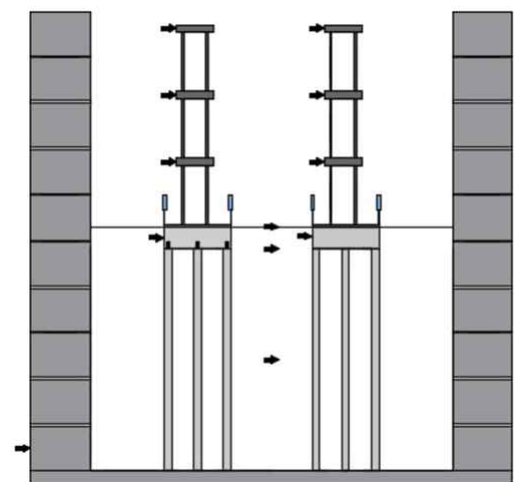


(e) 말뚝 캡 설치

그림 68. 실험모형 제작 과정



(a) 단자유도 구조물 실험



(a) 다자유도 구조물 실험

그림 69. 동적원심모형실험 단면

(2) 원심모형실험 결과 분석

(가) 말뚝기초 위 단자유도 구조물의 동적 거동

① 구조물 측정 가속도

동적 원심모형실험을 통해서 계측된 기초-단자유도 구조물 시스템의 대표적인 지진 시 가속도 계측 기록을 [그림 70 - 72]에 도시하였다. 단자유도 구조물 3이 설치되어 있을 때, Hachinohe 지진이 입력된 결과로 기반암 가속도에 따라서 정리 되었다. FND1은 말뚝 캡과 말뚝 기초가 볼트로 결합되어 있는 결합 기초이고, FND2는 결합이 되어 있지 않은 분리 말뚝 기초 이다.

기반암 가속도가 0.07g로 작을 때는 두 시스템의 거동이 매우 유사하게 나타나고 있다. 기초의 응답에 비해서 구조물의 응답이 증폭하게 되며, 이 때 시간 이력은 구조물의 고유 주기에 따라서 위상이 늘어난다. 또한 기초의 수직 가속도 기록은 거의 나타나지 않아 회전 운동이 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있다.

반면에 입력 지진의 최대 가속도가 0.14g 이상으로 커지게 되면 두 시스템의 거동은 전혀 다른 거동 특성을 보인다. 우선, 결합 말뚝 기초의 경우에는 기반암 가속도가 작을 때와 마찬가지로 기초의 수직 가속도는 0에 가까우면 기초의 수평가속도 대비 구조물 지붕의 가속도가 크게 증폭하였다. 그러나 분리 말뚝 기초의 경우에는 기초의 수직 거동이 구조물의 거동이 유사한 정도로 크게 발현이 되며 상대적으로 구조물 지붕의 가속도 증폭은 현저히 줄어든 것을 확인 할 수 있다. 이러한 경향은 기반암 가속도가 0.25g로 커질 때 더욱 명확히 나타나게 된다. [그림 72-(b)]에서는 구조물 지붕의 응답이 기초의 수평 거동과 유사한 크기로 발현되며, 기초의 수직 가속도가 훨씬 크게 나타났다. 이는 말뚝캡이 말뚝 기초와 분리 되어 있을 경우, 기초(말뚝캡)의 회전거동을 허용하여 지진 에너지가 소산되므로 상부구조물의 지진하중이 저감되는 효과를 보여준다.

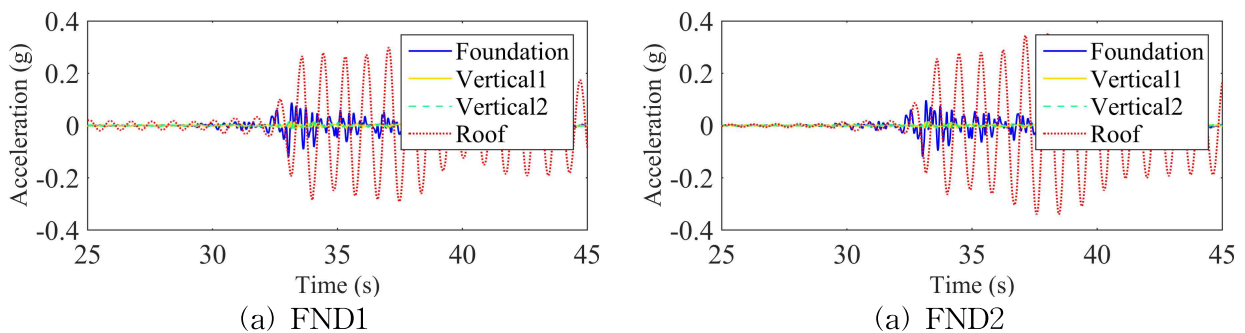


그림 70. 기초 및 상부구조물 측정가속도 (Hachinohe - No.22 - PGA : 0.0696 g)

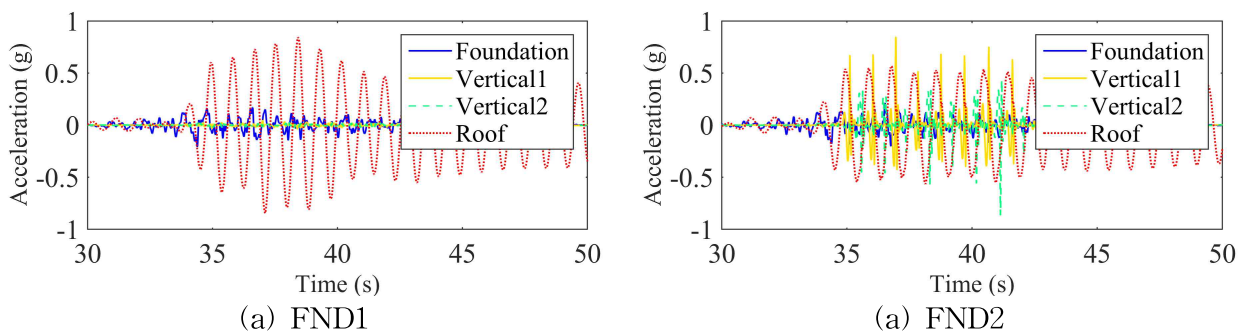


그림 71. 기초 및 상부구조물 측정가속도 (Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1385 g)

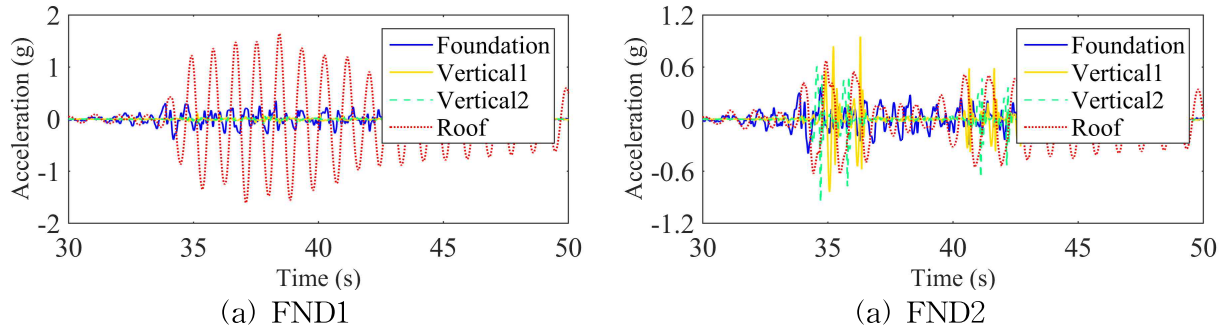


그림 72. 기초 및 상부구조물 측정가속도 (Hachinohe - No.29 - PGA : 0.2540 g)

② 기초 대비 구조물 상대거동 및 기초 회전에 의한 구조물 응답

기초의 수평 거동 대비 구조물의 상대 거동 및 기초 회전에 의한 구조물의 응답을 비교한 결과를 [그림 73 - 75]에 나타내었다. 말뚝캡과 말뚝이 결합된 말뚝기초(FND1)에서는 기반암 가속도가 0.25g 이상 증가하여도 기초의 회전 거동이 거의 발생하지 않고 0에 가깝다. 이는 기반암에 지지되어 있는 말뚝에 기초(말뚝캡)가 결합되어 있으므로 지진 시 기초의 수직 및 회전 거동이 억제되기 때문에 나타난다. 즉, 말뚝이 기초가 결합되어 있을 경우, 기초 자체의 회전거동에 의한 에너지 소산은 매우 작게 일어남을 알 수 있다.

하지만 분리 말뚝 기초의 경우에는 기반암 가속도가 커질수록 기초의 회전에 의한 구조물의 응답이 증가한다. 결합 말뚝기초와 달리 분리 말뚝기초의 경우에는 얇은 기초와 같이 하부 말뚝 기초는 지반의 강성을 증가시키지만, 기초의 들뜸에 대한 억제는 불가능하다. 따라서 지진 하중이 커질수록 크게 유발되는 상부 구조물의 전도 모멘트에 의해서 기초의 회전 거동이 증가하게 되는 것이다. 이로 인해서 구조물의 기초 대비 상대거동은 현저히 줄어들게 되며, 지지에 의한 가속도 위상도 변하게 될 수 있다. [그림 75]에 나타났듯이 결합 말뚝 기초와 분리 말뚝 기초에서 기초대비 구조물 상대거동은 최대 2배 이상의 차이를 보이고 있다. 즉, 내진 설계의 관점에서는 말뚝기초와 말뚝 캡을 분리하여 말뚝 캡의 움직임을 허용하는 것이 상부 구조물의 지진 하중을 줄여서 경제적이고 합리적인 설계에 용이할 것으로 판단된다.

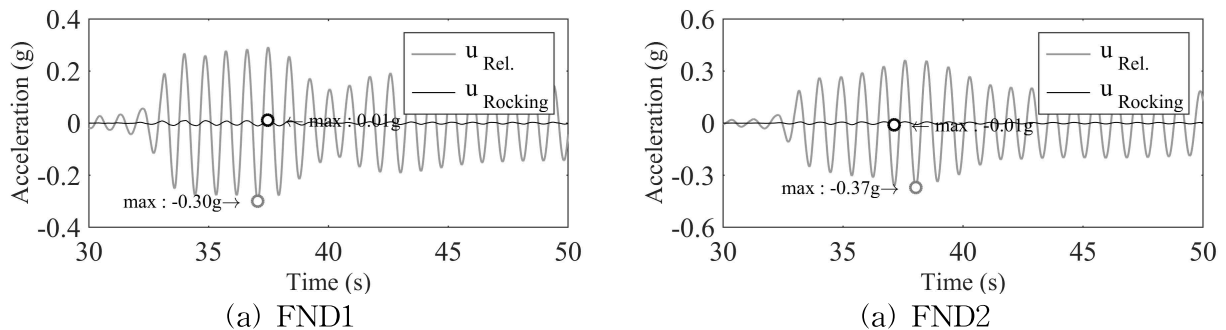
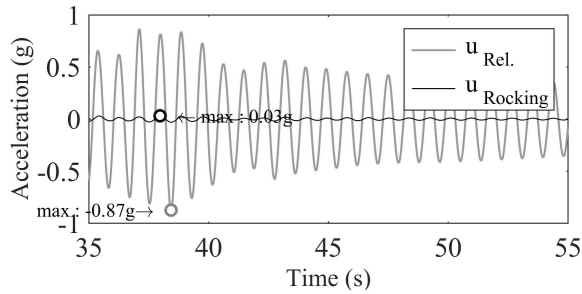
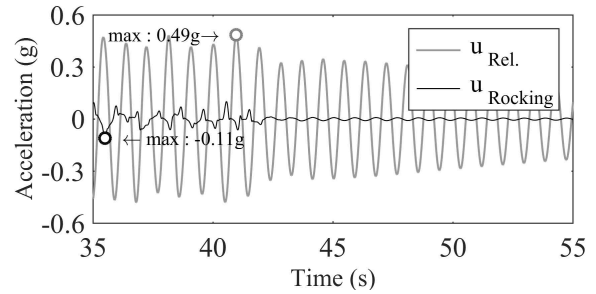


그림 73. 기초 대비 상대 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.22 - PGA : 0.0696 g)

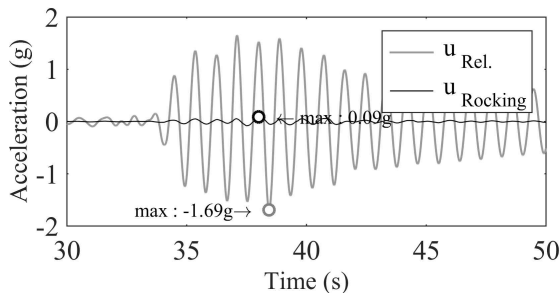


(a) FND1

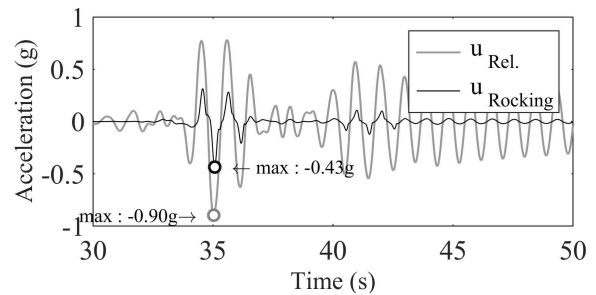


(a) FND2

그림 74. 기초 대비 상대 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1385 g)



(a) FND1

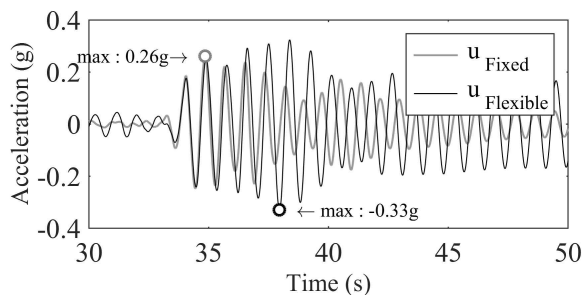


(a) FND2

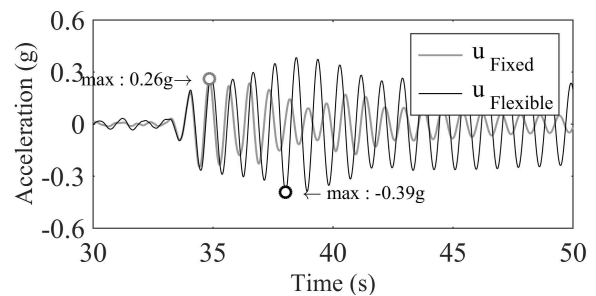
그림 75. 기초 대비 상대 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.29 - PGA : 0.2540 g)

③ 고정단 기초 거동과 유연한 기초 거동

현행 내진설계에서 산정하는 지진하중과 실제 거동을 비교하기 위해서 자유장 지표면 운동으로부터 계산된 고정단 기초 거동과 계측된 유연한 기초 거동의 가속도 시간이력을 [그림 76 - 78]에 나타내었다. 앞절에서 언급한 바와 마찬가지로 기초 회전에 의한 항복 거동은 기반암 가속도가 크게 입력되었을 때 명확하게 발현될 수 있다. 따라서 [그림 78]와 같이 기반암 가속도가 큰 경우에는 말뚝과 기초가 분리된 기초의 경우에 유연한 기초 거동이 고정단 기초 거동에 비해서 현저히 줄어드는 현상이 나타난다. 이에 반해서 결합 말뚝기초의 경우에는 기반암 가속도에 비례하여서 고정단 기초 거동과 유연한 기초 거동이 거의 유사하게 발현 되었다.

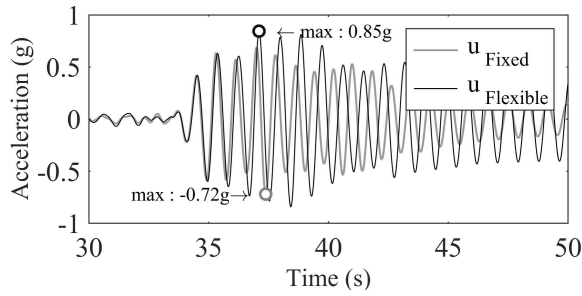


(a) FND1

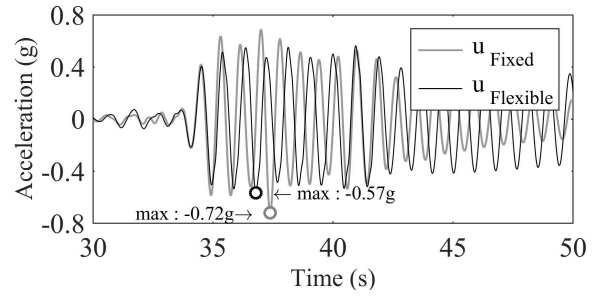


(a) FND2

그림 76. 고정단 거동과 SFSI가 고려된 유연한 거동 비교
(Hachinohe - No.23 - PGA : 0.0806 g)

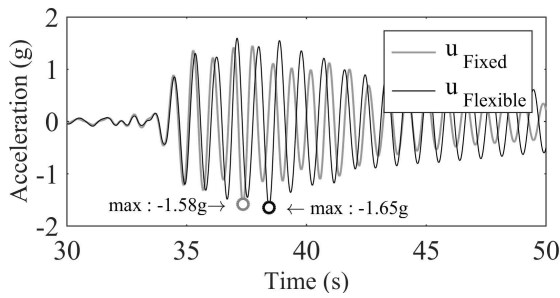


(a) FND1

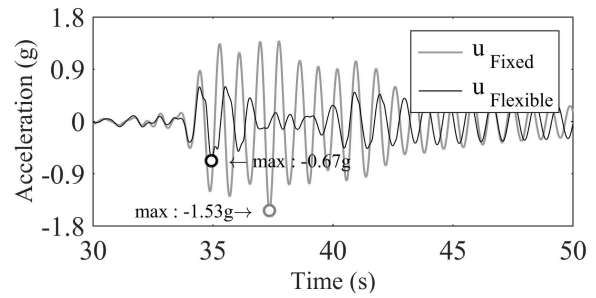


(a) FND2

그림 77. 고정단 거동과 SFSI가 고려된 유연한 거동 비교
(Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1385 g)



(a) FND1



(a) FND2

그림 78. 고정단 거동과 SFSI가 고려된 유연한 거동 비교
(Hachinohe - No.29 - PGA : 0.2540 g)

입력 지진하중의 세기와 지진파의 특성에 따른 추이를 보기 위해서 단자유도 구조물 3에 대한 모든 가진 결과에 대해서 고정단 거동과 유연한 거동의 시간이력 최댓값을 [그림 79]과 같이 도시하였다. 대부분의 기록은 고정단 거동과 유연한 거동이 유사하게 1:1 선상에 표시 되어 있다. 이는 기반암 가속도 수준이 커진다고하여도 지진파의 주된 주파수 특성과 상부 구조물의 주파수 특성이 멀어지게 되어 상부 구조물의 거동이 작게 발생되기 때문으로 판단된다. 반면 본 장에서 자세히 살펴본 Hachinohe 실험 결과에서는 기초의 항복 거동에 따른 상부 구조물의 차이가 명확히 나타난다. 붉은색 점으로 표시된 결합 말뚝 기초(FND1)의 경우에는 1:1 선상에서 고정단 기초운동에 비례하여 유연한 거동이 증가하나, 푸른색 점으로 표시된 분리 말뚝 기초(FND2)에서는 유연한 거동이 고정단 거동이 증가하여도 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 앞선 장에서 관찰한 얇은 기초의 지진 시 거동과 매우 유사하다. 즉, 기초의 회전 운동에 의한 항복 거동이 발생되게 되면 상부 단자유도 구조물의 지진 시 응답은 기초의 지지력에 따라서 일정한 값으로 제한 될 수 있음을 보여주고 있다.

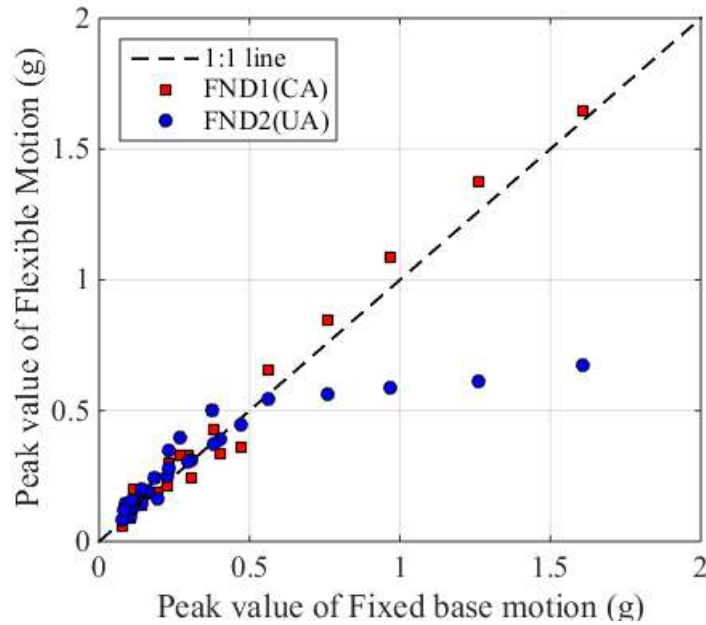
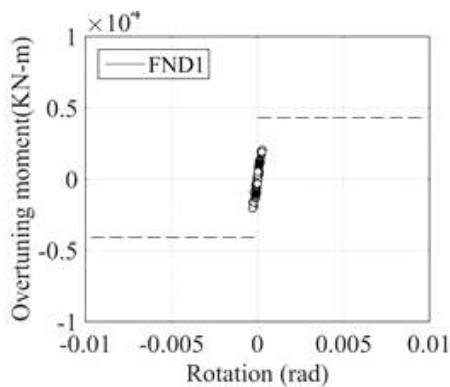


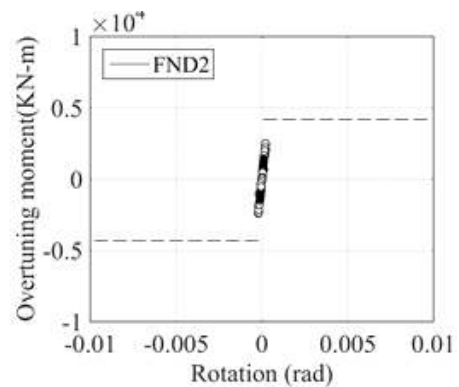
그림 79. 고정단 기초 거동과 SFSI가 고려된 유연한 기초 거동 최대값 비교

③ 기초 회전각과 전도 모멘트 관계를 이용한 감쇠비 평가

기초의 회전각과 상부 구조물에 의해서 유발되는 전도모멘트 사이의 관계를 이력곡선으로 나타내게 되면 시스템의 거동 특성(선형 또는 비선형) 및 지진 에너지 감쇠 특성을 파악할 수 있다. [그림 80 - 82]은 기반암 가속도에 따른 대표적 기초 회전각과 전도 모멘트 관계를 나타내고 있다. 얇은 기초에서와 같이 말뚝캡과 말뚝기초의 결합 유무에 관계없이 약한 지진이 입력되었을 때는 작은 량의 전도 모멘트 발현과 함께 이력곡선이 직선 형태를 띄는 선형 거동 특성을 보인다. 그러나 입력 하중 크기의 증가와 함께 분리 말뚝 기초(FND2)에서는 이력곡선이 옆으로 기울어지는 비선형 거동과 함께 내부 영역이 증가하며 시스템의 에너지가 소산되는 현상이 관찰 되었다. 또한 전도 모멘트의 증가량 역시 결합 말뚝 기초(FND1)에서 초기 1800kNm에서 9800kNm로 약 5배 정도 증가한데 비해서, 분리 말뚝 기초에서는 2배이하의 증가폭을 보였다. 이는 앞 절에서 언급된 상부 구조물의 지진하중이 기초의 항복거동에 의해서 제한되므로 구조물에서 유발되는 전도모멘트도 작아지기 때문이다.

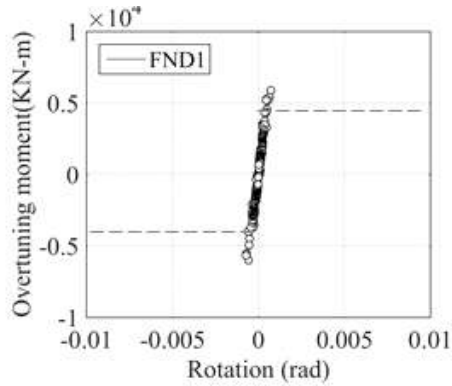


(a) FND1

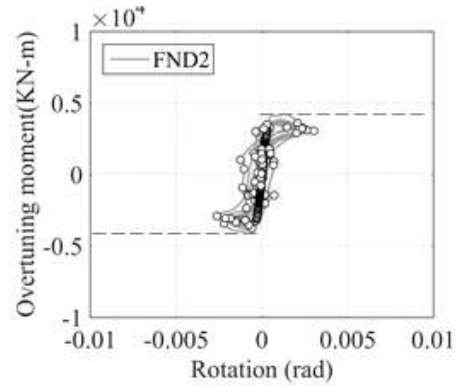


(a) FND2

그림 80. 기초 회전 각과 전도 모멘트 관계 (Hachinohe - No.22 - PGA : 0.0696 g)

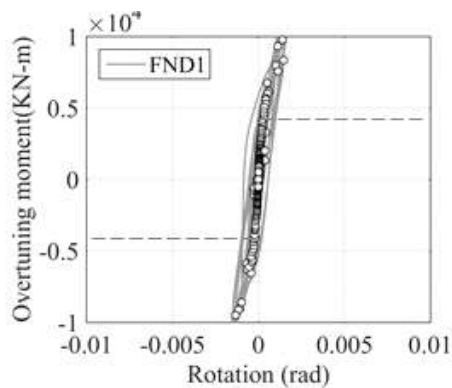


(a) FND1

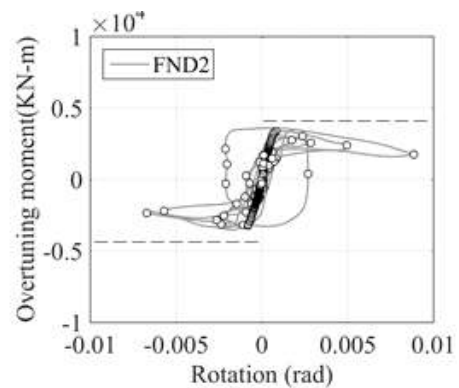


(a) FND2

그림 81. 기초 회전 각과 전도 모멘트 관계 (Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1385 g)



(a) FND1



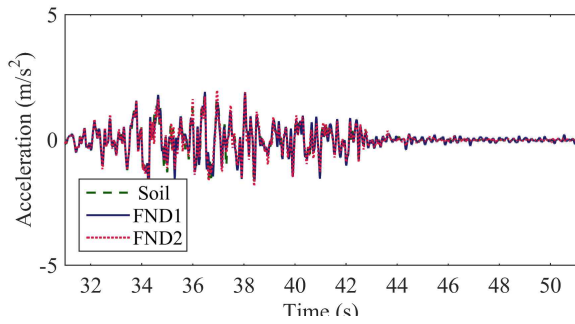
(a) FND2

그림 82. 기초 회전 각과 전도 모멘트 관계 (Hachinohe - No.29 - PGA : 0.2540 g)

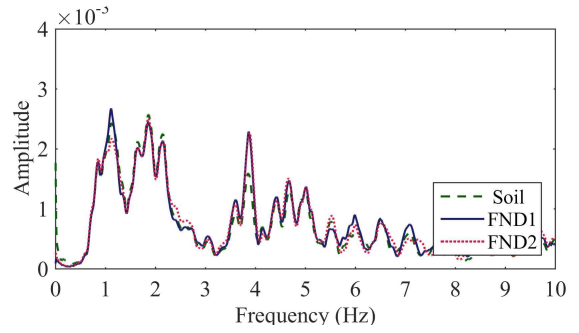
(나) 다자유도 구조물의 동적 거동

① 기초 및 자유장 지표면 거동

[그림 83]는 다자유도 구조물 2를 말뚝 기초 위에 설치하고, 0.15g의 최대값을 가지는 Hachinohe 지진을 가진하였을 때, 자유장 지표면과 결합 말뚝기초와 분리 말뚝 기초의 수평가속도를 시간이력과 주파수 영역에서 비교한 결과이다. 일반적으로 강성이 큰 말뚝 기초 위에 전면기초(말뚝 캡)이 놓일 경우에 상대적으로 지반에 비해서 작은 증폭이 발생하거나, 상부 구조물의 관성력에 의해서 수평 움직임이 변화 할 수 있다. 그러나 본 실험에서 계측한 결과 시간이력과 주파수 영역 신호 모두 자유장 지표면, 결합 말뚝 기초, 분리 말뚝기초에서 큰 차이가 없게 나타났다. 이는 말뚝기초 주변 지반이 지진 시에 말뚝 시스템을 미는 힘이 매우 크기 때문에 말뚝의 거동이 지반의 거동에 지배되기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 단, 상부 시스템의 질량이 매우 큰 경우에는 상부 시스템에서 오는 관성력에 의해서 차이가 발생할 가능성이 존재한다.



(a) 시간이력

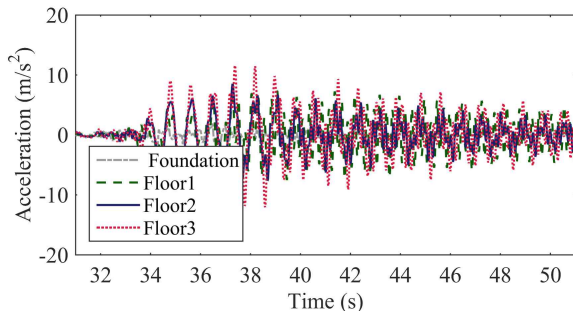


(a) 주파수 영역

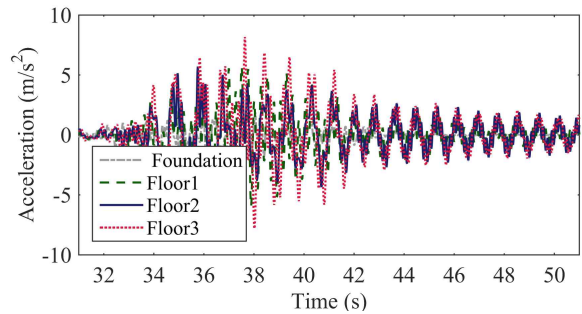
그림 83. 자유장 지표면과 기초 거동 (Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1463 g)

② 기초 및 구조물 측정 가속도

[그림 84]는 대표적인 층별 가속도의 시간이력을 나타내고 있다. 붉은색으로 표시된 최상층의 가속도 기록이 다른 층에 비해서 크게 발현되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 지반의 깊이 및 다자유도 구조물의 층별 가속도 최댓값을 위치별로 도시하여 [그림 85 - 87]에 나타내었다. 구조물의 층별 가속도 경향은 앞서 언급한 가속도의 증가패턴과 유사한 형태를 보이고 있다. 약한 지진 시에는 구조물의 층별 가속도 최댓값은 차이가 크게 나타나지 않지만 기반암 가속도가 증가하게 되면 결함 말뚝 기초(FND1)의 가속도 크기가 분리 말뚝 기초(FND2)에 비해서 크게 나타나고 있다.



(a) FND1



(a) FND2

그림 84. 구조물 층별 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1463 g)

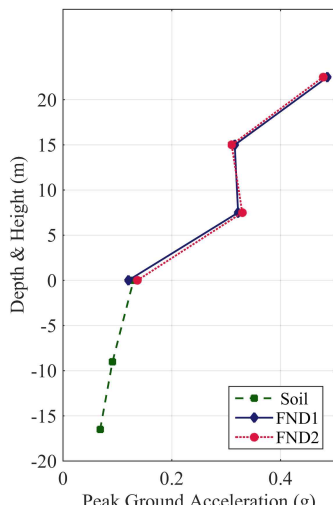


그림 85. 깊이별 최대 가속도
(Hachinohe - No.22 - PGA : 0.0688 g)

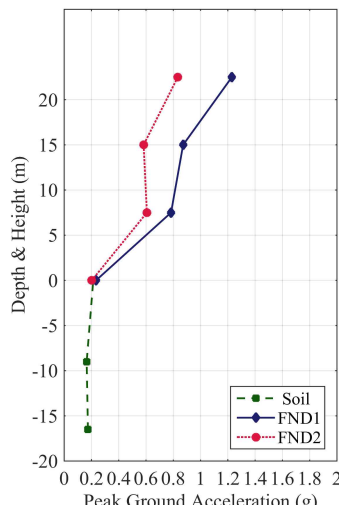


그림 86. 깊이별 최대 가속도
(Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1463 g)

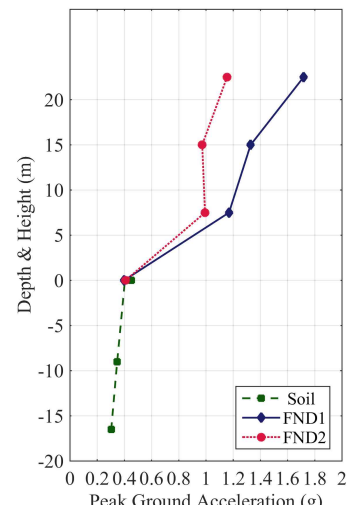
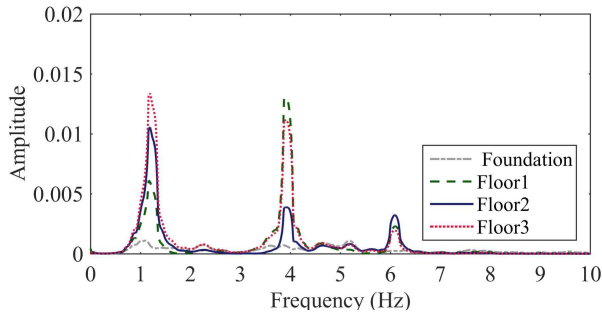


그림 87. 깊이별 최대 가속도
(Hachinohe - No.29 - PGA : 0.2730 g)

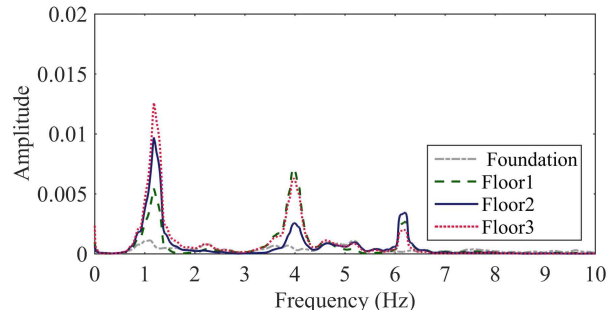
③ 구조물 가속도 주파수 해석

고속 푸리에 변환을 통해서 계측된 구조물의 층별 가속도 기록을 주파수 영역 신호로 변환하여 [그림 88 - 89]에 나타내었다. 구조물은 3개의 모드에 대해서 각각 1, 4, 6 Hz의 고유 주파수를 보여주고 있으며, 각 모드에서의 층별 응답의 크기가 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉, 1Hz에서는 최상층에서 가장 크게 나타나고, 4Hz에서는 1층에서 응답이, 6Hz에서는 2층에서의 응답이 가장 크게 나타났다. 지진하중이 작을 때와 지진하중이 커졌을 때의 고유 주파수는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 특히, 결합 말뚝 기초(FND1)의 경우에는 공진이 나타나는 주파수 주변의 파형도 기반암 가속도가 작을 때와 클 때에 따른 변화가 없다.

그러나 분리 말뚝 기초의 경우에는 기반암 가속도가 0.7g로 작을 때는 공진 주파수가 명확하며 에너지도 공진 주파수 앞 뒤로 고르게 분포하였다. 그러나 기반암 가속도가 커지게 되면서 공진 주파수 주변의 에너지도 커지게 되면서 공진 주파수 주변 신호 영역이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 이는 기초-구조물 시스템의 항복거동으로 에너지 소산이 발생하고 감쇠비가 증가하여 나타나는 현상으로 판단된다.

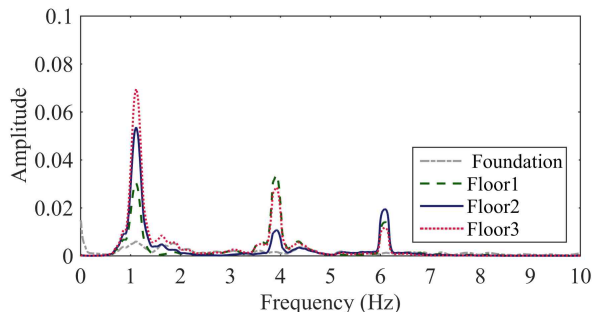


(a) FND1

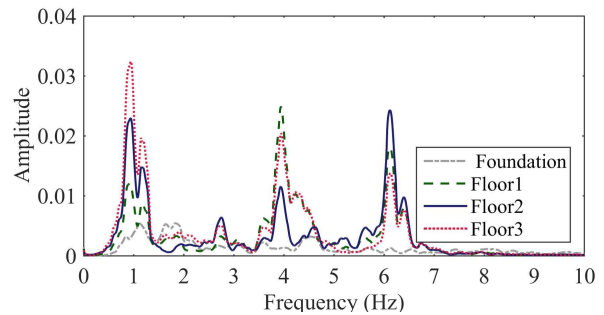


(a) FND2

그림 88. 구조물 층별 가속도 FFT 결과 (Hachinohe - No.22 - PGA : 0.0688 g)



(a) FND1



(a) FND2

그림 89. 구조물 층별 가속도 FFT 결과 (Hachinohe - No.29 - PGA : 0.2730 g)

나. 지지층까지 근입되지 않은 말뚝기초의 기초판 결합 유무에 따른 지진 시 영향 평가

말뚝-기초판 결합 유무에 따른 시스템의 내진 성능 평가를 위해서는 지진하중 뿐 아니라 침하 특성에 대한 연구도 함께 수행되어야 한다. 앞 절에서는 말뚝기초가 암반에 지지된 선단지지 말뚝으로 침하가 발생하기 힘들었다. 본 절에서는 말뚝기초가 지지층까지 근입되지 않은 말뚝기초 시스템을 모사하고 말뚝-기초판의 결합 유무와 말뚝과 기초판 사이의 매질층의 종류에 따른 지진 시 거동을 평가하고자 하였다.

(1) 원심모형실험 모델링

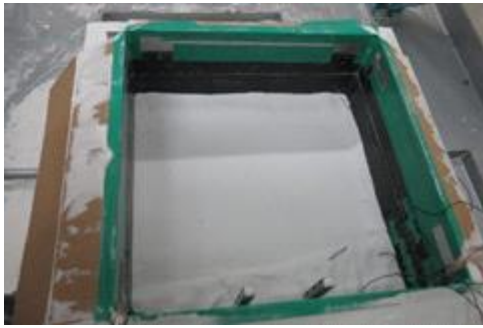
(가) 실험 모델 제작 및 단면

[그림 90]은 말뚝이 지지층까지 근입되지 않은 말뚝기초 시스템 실험 모델을 제작하는 과정을 보여주고 있다. 우선 낙사기를 이용하여 실리카 모래를 낙사시켜 하부 지반을 조성하였다. 지진 시 침하를 크게 유발하기 위하여 약 40%의 낮은 상대밀도에 맞춰 낙사 조건을 조절하였다. 그리고 조성된 건조 사질토 지반에 말뚝기초를 향타하여 설치하였으며, 이 때 설치된 말뚝기초의 직경, 두께, 길이, 배열은 앞 절에서 사용된 말뚝기초와 동일하다. 말뚝기초가 설치된 후에 말뚝과 전면기초의 결합 조건에 따라서 낙사, 자갈층 설치 등 말뚝과 전면기초 사이 층을 조성하였다. 본 실험에서는 말뚝과 기초가 결합된 기초, 말뚝과 기초가 결합되지 않은 기초 (중간층: 자갈과 건조 사질토), 얇은기초 등 총 4가지 경우에 대한 모델을 조성하여 실험을 수행하였다. 중간층 조성 후 전면기초를 설치하고 기초가 근입될 수 있도록 주변 지반을 하부지반과 동일하게 낙사를 통하여 조성하였다. 마지막으로 단자유도 구조물과 침하계 등 센서를 설치하여 모델 조성을 마무리 하였다.

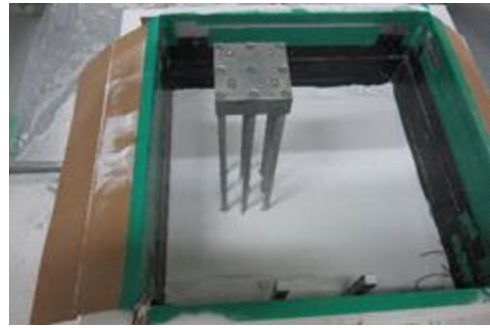
최종적으로 조성된 실험 단면은 [그림 91]와 같다. [그림 91-(a)]는 얇은기초와 말뚝과 기초사이 지반이 사질토인 비결합 말뚝기초에 대한 단면이며, [그림 91-(b)]는 결합 말뚝기초와 말뚝과 기초 사이 지반이 자갈층인 실험에 대한 단면이다. 이전에 수행되었던 실험과 동일하게 지반에 깊이별 가속도계를 매설하였으며, 기초와 구조물의 동적 특성을 파악하기 위해서 가속도계를 설치하였다. 기초의 침하 및 회전각을 측정하기 위해서 변위계를 설치하였으며, 지반의 전단과 속도 측정을 위해서 벤더 엘리먼트를 매설하였다.

표 14. 말뚝 기초 결합 형태에 따른 동적 원심모형실험
(말뚝이 지지층까지 근입되지 않은 경우, Floating Pile)

Soil Type	No. of Structure	실험	기초 종류
Loose Sand (Dr=50%)	SDOF 3	실험 1	비결합 말뚝 기초 (사질토 중간층)
			얇은 기초
		실험 2	비결합 말뚝 기초 (자갈 중간층)
			결합 말뚝 기초



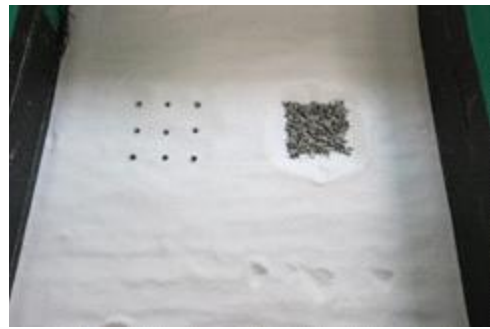
(a) 하부 지반 조성



(b) 말뚝 설치



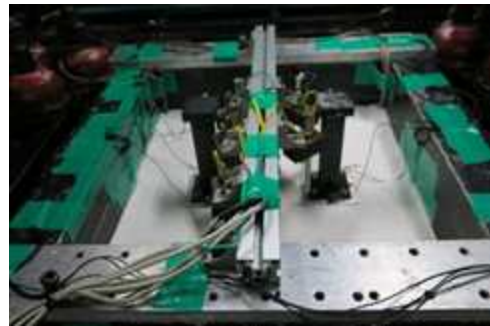
(c) 말뚝과 기초 사이 중간층 조성



(d) 중간층 설치 모습 (결합기초, 자갈층)

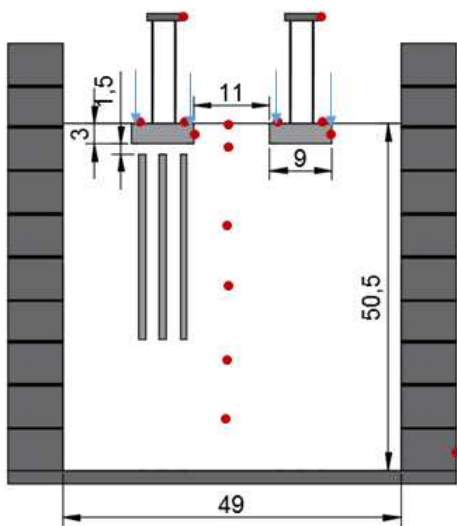


(e) 전면기초 설치

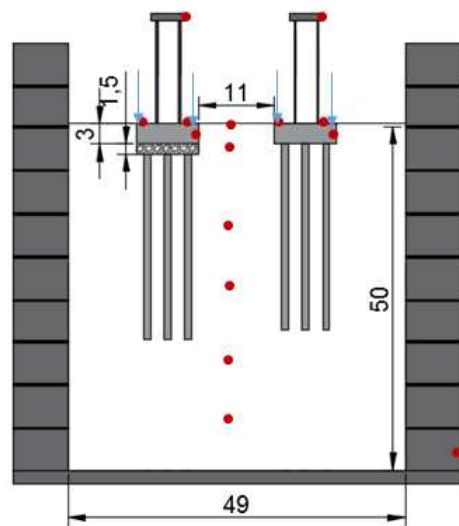


(f) 추가 지반 조성 및 구조물 설치

그림 90. 실험모형 제작 과정



(a) 실험 1



(a) 실험 2

그림 91. 원심모형실험 단면

(나) 입력지진파

본 실험은 실 지진파의 입력 시 말뚝 기초 시스템의 지진 거동 특성을 분석하는데 초점을 맞추어 수행되었다. [표 11]의 Ofunato, Northridge, Hachinohe 지진파를 입력 지진파로 활용하였다. 초기 강진 시 침하 특성을 보기 위하여 기반암 가속도 기준으로 약 0.3g 이상의 강진을 먼저 가진하였으며, 이후에 지진세기를 점진적으로 증가시키며 입력지진하중에 따른 시스템의 지진하중 변화를 관찰하였다. 입력지진파의 가진 순서를 [그림 92]에 나타내었다.



그림 92. 입력 지진 하중 순서

(2) 원심모형실험 결과

(가) 지반 전단파 속도 결과

원심모형실험 진행에 따라 변화된 지반의 전단파 속도 주상도는 [그림 93]에 도시하였다. 원심가속도를 50g 수준으로 높인 뒤 지진 실험을 수행하기 전, 지반의 평균 전단파 속도는 두 실험의 경우 모두 약 200m/s로 나타났으며, 이 때, 모형지반의 고유주기는 약 0.52초이다. 초기 강진이 가해진 이후에 지반의 전단파 속도는 전반적으로 약 10 - 20 m/s 증가하였으며, 단계별 가진까지 모든 지진 실험이 끝난 이후에는 최종적으로 약 30 - 40 m/s의 전단파 속도가 증가하였다. 이는 초기에 상대적으로 느슨하게 구성되어 있던 지반이 지진에 의해서 조밀하게 되면서 전체적인 지반의 강성이 증가하였음을 보여준다.

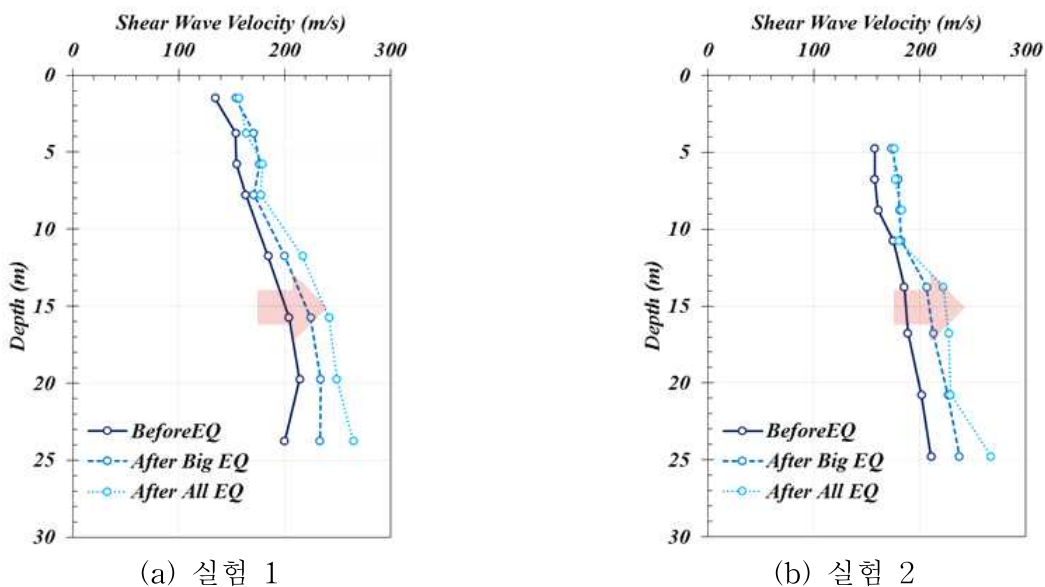
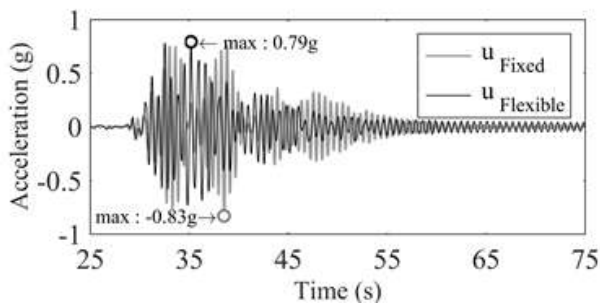


그림 93. 전단파 속도 주상도 변화

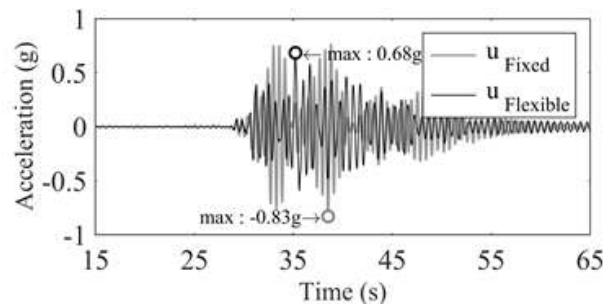
(나) 구조물 지진하중

[그림 94]은 Hachinohe 지진파가 기반암 가속도 수준 약 0.30g가 입력되었을 때, 단자유도 구조물의 고정단 거동과 유연한 거동을 비교하여 나타낸 그림이다. [그림 94-(c)]는 결합 말뚝기초의 경우로 두 운동 사이의 값 차이가 매우 적게 나는 것을 보여준다. 이는 전면기초와 결합된 말뚝기초가 기초의 회전 거동을 억제하기 때문에 단자유도 구조물의 하부지지 조건이 고정된 조건과 유사하기 때문에 나타나는 현상이다. 반면, [그림 94-(a), (b), (d)]는 얇은기초와 비결합 말뚝기초의 결과로 모두 고정단 거동에 대비하여 유연한 거동이 작게 타나나는 것을 알 수 있다. 세 가지 기초 조건 모두 지진 시 전면기초의 수평 및 회전 운동이 구속되지 않기 때문에 기초의 회전 운동이 상부 구조물의 지진하중을 제한할 수 있게 되는 것으로 판단된다.

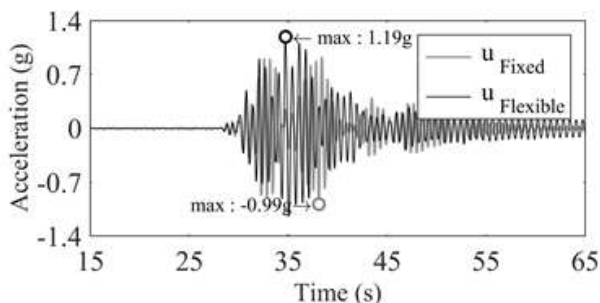
입력 지진파 별로 고정단 거동 대비 유연한 거동의 변화를 보기 위해서 [그림 95]과 같이 시간이력의 피크값들을 모아서 나타내었다. 이 때, 비교를 위해서 앞절에서 수행된 선단지지 말뚝기초의 결과를 함께 도시하였다. 속이 비어있는 표식은 단계별 가진을 통해서 얻어진 결과이며, 속이 채워진 표식은 초기 강진 시에 얻어진 결과이다. 전면기초의 회전이 허용된 경우(얇은기초, 비결합 말뚝기초)에는 유연한 거동의 피크값들이 저면의 최대 지지모멘트에 의해서 정해지는 최대 지진하중에 수렴하는 결과를 보여준다. 반면 결합된 말뚝기초에서는 고정단 거동과 유사한 크기의 유연한 거동이 발현된다. 그리고 속이 채워진 표식들도 속이 빈 표식들의 경향성을 따라가므로 초기 강진 시 결과도 이후에 수행된 단계별 가진 결과를 따라감을 알 수 있다.



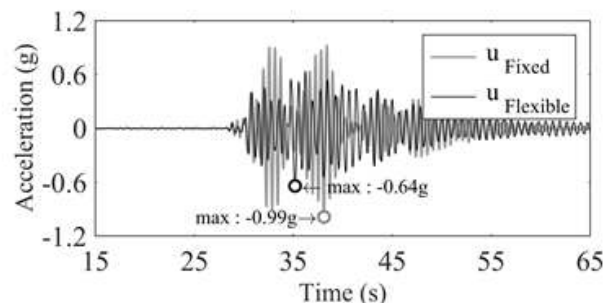
(a) 얇은기초



(b) 비결합 말뚝기초 (사질토 중간층)



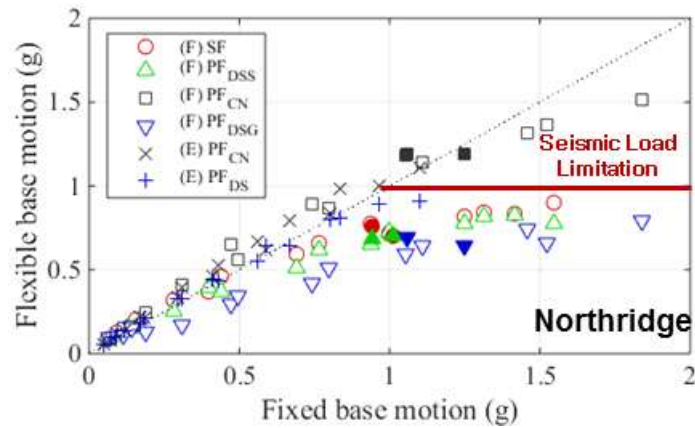
(c) 결합 말뚝기초



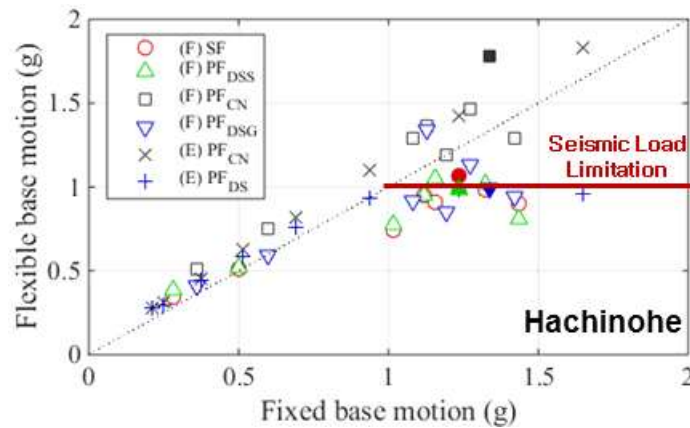
(d) 비결합 말뚝기초 (자갈 중간층)

그림 94. 고정단 거동 대비 유연한 거동 시간이력

(Hachinohe - PGA : 약 0.30 g)



(a) 입력지진파 : Northridge



(b) 입력지진파 : Hachinohe

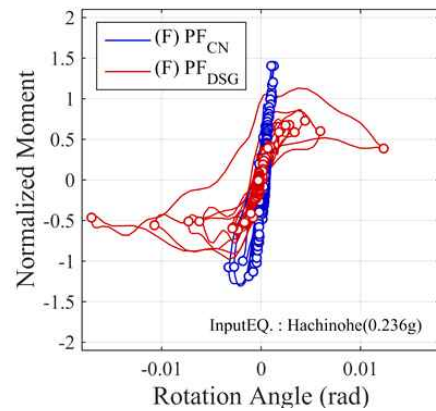
그림 95. 고정단 거동과 유연한 거동의 최댓값 비교

(다) 기초 회전각 대비 정규화 전도 모멘트

기초의 회전각과 기초 하부에 걸리는 전도 모멘트 관계는 지진 시 기초 시스템의 회전 특성을 반영하는 중요한 요소이다. [그림 96]은 지진하중의 세기에 따른 기초 회전각 대비 정규화 전도 모멘트 곡선을 나타내고 있다. 정규화 전도 모멘트는 기초 하부에 걸리는 전도 모멘트를 최대지지 모멘트로 나눈 값을 의미한다. [그림 96-(a), (c)]를 보면 기초의 종류에 상관없이 가해지는 지진하중이 작을 때는 이력곡선이 선형적인 형태를 나타낸다. 또한 이력곡선 내부 면적이 매우 작게 나타나 기초 회전이 거의 발생하지 않으며, 회전거동에 의한 지진 에너지 소산량도 매우 적은 것을 알 수 있다. 이에 반해 [그림 96-(b), (d)]에 나타난 이력곡선은 기초 형태에 따른 차이가 뚜렷하게 나타난다. 시스템에 입력되는 지진하중의 크기가 증가하게 되면 기초의 회전과 시스템의 전도 모멘트도 증가하게 된다. 하지만 기초의 회전 거동이 허용되는 얇은기초와 비결합 말뚝기초의 경우에는 기초-지반 면의 최대지지 모멘트에 의해서 시스템의 최대 전도 모멘트는 제한되게 된다. 따라서 정규화 전도 모멘트가 대부분 1을 넘지 못하고 이력곡선이 옆으로 누는 형태의 결과가 나타나고, 이력곡선 내부의 면적도 크게 증가하여 지진 에너지가 회전거동에 의해서 소산됨을 알 수 있다. 이에 반해 말뚝과 전면기초가 결합된 경우, 전도모멘트는 증가하지만 고정조건에 의해서 회전각이 크게 변하지 않기 때문에 여전히 선형적인 형태의 이력곡선을 보였다.

(a) 실험 1 (Hachinohe - PGA : 0.069g)

(a) 실험 1 (Hachinohe - PGA : 0.369g)



(c) 실험 2 (Hachinohe - PGA : 0.065g)

(a) 실험 2 (Hachinohe - PGA : 0.236g)

그림 96. 기초 회전각 대비 전도 모멘트

기초 시스템의 회전 특성 및 에너지 소산 특성을 전반적으로 살펴보기 위해서 [그림 97]와 [그림 98]에 기초 회전각 대비 회전강성과 감쇠비 변화를 나타내었다. 본 결과에서도 앞절의 선단지지 말뚝기초 실험결과를 함께 도시하였다. 회전각이 작을 때 회전강성을 살펴보면 말뚝이 기초와 결합되어 있는 경우와 결합되어 있지 않더라도 말뚝과 기초가 접해있을 때, 상대적으로 큰 강성을 보였다. 그리고 회전강성은 시스템의 회전각이 증가할수록 감소하는 특성을 보이는데, 전면기초의 회전을 허용하고 있는 얇은기초, 비결합 말뚝기초의 결과와 선단지지이 되지 않은 결합 말뚝 기초의 강성 감소 특성은 상이하게 나타났다. 이는 하부에 말뚝이 없거나 전면기초와 결합되지 않은 경우, 지진 시 전면기초 회전에 의해서 회전 강성이 정해지지만, 말뚝이 결합된 경우 말뚝의 지지로 인해서 시스템 회전을 위한 강성이 커지기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

[그림 98]에 나타난 감쇠비 변화의 경우에는 약 0.15에서 0.4사이의 값을 가지며 하부 기초 시스템에 따라서 큰 차이를 보이지 않고 있다. 약 0.0001 rad의 회전각까지 감쇠비가 감소하는 경향을 보이고 있는데 이 부분은 매우 작은 회전각에 대한 결과로 추가적인 검증이 필요하다. 이러한 회전각 대비 강성 및 감쇠비 곡선은 향후 변위기반 설계에서 시스템의 지진 시 변위를 산정하는데 중요한 변수가 될 수 있다.

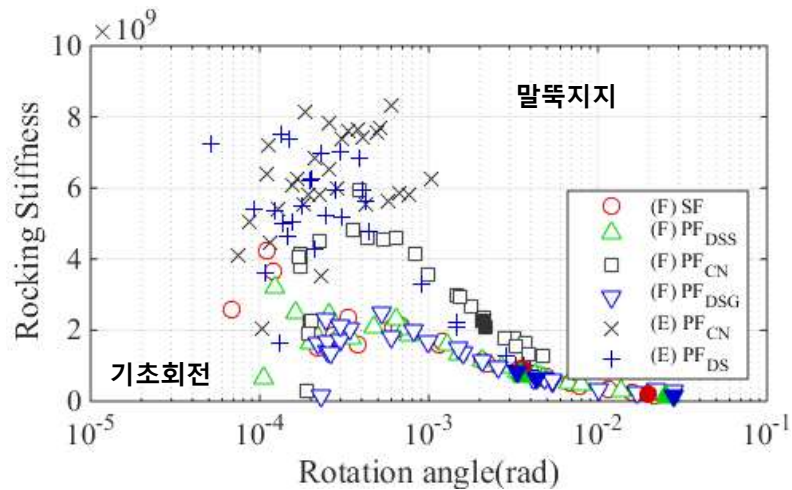


그림 97. 기초 회전각 대비 회전 강성 변화

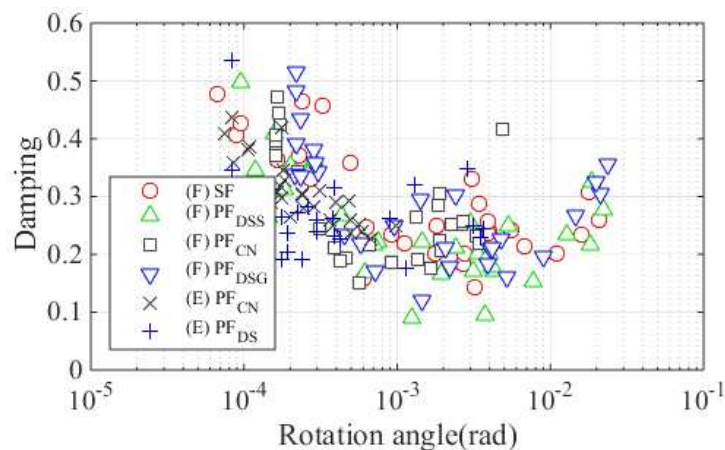


그림 98. 기초 회전각 대비 감쇠비 변화

(라) 지진 시 기초 시스템 침하 특성

비결합 말뚝 기초 시스템이 얇은기초 시스템에 비해서 가지는 장점은 지진 시 침하량 억제에 있다. [그림 99]은 Northridge 지진파가 기반암 가속도 기준 0.3g 이상의 강진이 입력되었을 때, 기초 시스템의 수직 침하 패턴을 보여주고 있다. 얇은기초의 경우에는 자유장 지표면보다 큰 침하량이 발생하였으며, 하부에 말뚝기초가 설치된 경우에는 모두 자유장 지표면보다 작은 침하량이 발생하였다. 말뚝과 전면기초가 결합되어 있는 경우에 가장 작은 침하량을 보였으나, 결합 말뚝기초의 경우 상부에 큰 지진하중이 발현되는 단점이 있다. 비결합 말뚝기초에서 말뚝과 전면기초 사이의 매질에 따른 침하량을 비교해 보면, 중간층의 매질이 강성이 작은 모래로 되어 있을 때 더 많은 수직 침하가 발생하였다.

모든 지진 입력 시, 자유장 지표면 대비 기초의 수직 침하량 기초 회전각에 따라서 [그림 100]에 도시하였다. 초기 강진 이후의 단계별 지진하중을 가진하였을 때는 이미 지반의 강성이 증가하여 침하량이 적게 발생하였다. 그러나 속이 채워진 표식으로 나타난 초기 강진 시의 자유장 대비 시스템의 영구 침하량은 훨씬 크게 나타났으며 기초 형식별 차이도 명확하다. 앞 선 결과와 같이 초기 강진 시 수직 침하량은 얇은기초, 자유장, 모래로 채워진 비결합 말뚝 기초, 자갈로 채워진 비결합 말뚝기초, 결합 말뚝기초 순으로 나타났다. 이는 추후 비결합 말뚝기초가 얇은기초에 비해서 침하량 억제에 큰 이점이 있으며, 비결합 말뚝기초를 설계에 활용할 때, 말뚝과 전면기초 사이의 매질의 강성을 키울 필요가 있음을 보여준다.

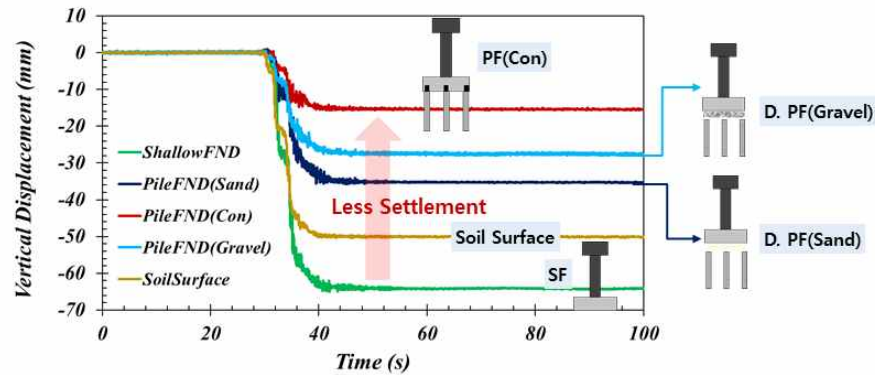


그림 99. 구조물의 기초 대비 상대 변위 및 기초 회전 거동에 의한 변위

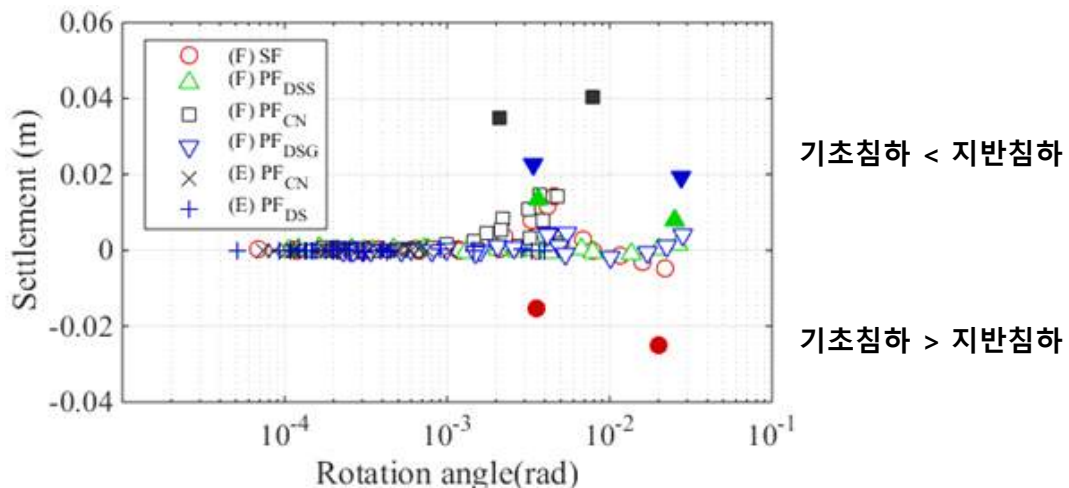


그림 100. 구조물의 기초 대비 상대 변위 및 기초 회전 거동에 의한 변위

다. 소 결

“말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 시 영향 평가“ 연구를 수행한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 말뚝 기초와 말뚝 캡이 결합되어 있을 경우에는 기초의 지진 시 회전 거동이 발생하지 않으며, 상부 구조물의 거동은 고정단 기초 거동과 유사함
- 말뚝 기초와 말뚝 캡이 분리되어 있을 경우에는 기반암 가속도 증가에 따라서 얇은기초와 같이 지진 시 회전 거동이 발생. 이를 통하여 비결합 말뚝 기초의 기초-구조물 시스템의 지진에너지는 소산되며, 상부 구조물의 지진하중은 감소함.
- 지진 시 기초 시스템의 수직 침하는 비결합 말뚝기초에서 얇은기초보다 작게 발생하며, 회전거동에 의한 상부 구조물 지진하중의 제한 효과는 동일하게 나타나므로 비결합 말뚝기초 형태가 항복거동을 이용하는 경제적이고 안전한 설계임을 확인함.

3. 풍화토 지반에서의 기초 하부 지반 항복 거동 적용성 평가

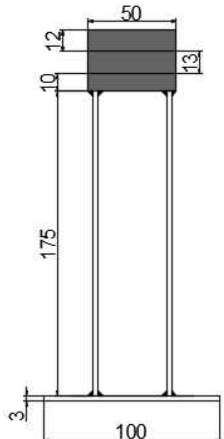
가. 풍화토 지반에서 얇은 기초의 지진 시 거동 평가

(1) 원심모형실험 모델링

(가) 단자유도 구조물 및 얇은기초 모델링

단자유도 구조물 및 얇은기초는 원심가속도 수준 20g의 상사법칙에 따라서 축소 모델링 되었다. 단자유도 구조물은 두 개의 얇은 판과 상부의 집중질량 그리고 하부 판을 용접하여 제작하였다. 1g에서 Impact hammer 시험을 통해서 구해진 구조물의 고유 주기는 0.022초이다. 이는 20g 원형수준에서는 0.44초에 대응되며, 건축구조기준(2009)에 제시된 건축물 근사 고유주기 약산식 (건축물 근사 고유주기 = $0.1 \times \text{층수}$)으로 비교하면 약 4 - 5층 건물의 고유주기와 유사하다. 만들어진 모형 구조물은 지붕에 질량이 집중된 이상적인 단자유도 시스템이 아니므로, 시험을 통해서 구해진 단자유도 구조물의 고유 주기를 바탕으로 이상화된 단자유도 시스템의 유효 질량과 유효 강성을 도출하였다 (김동관 등, 2014). [표 15]은 실험에 활용된 단자유도 구조물 모형 제원을 모형 수준으로 나타낸다.

표 15. 단자유도 구조물 제원

Structure models	SDOF
치 수 (mm)	
유효질량 (kg)	0.741
유효강성 (kN/m)	60.5
고유 주파수 (Hz)	45.5
고유 주기, T_n (sec)	0.022

얇은기초 모형은 기초 무게에 따른 지진 시 구조물 하중 및 기초 침하 특성을 관찰하기 위하여 알루미늄 기초와 철로 제작된 기초를 모델링하였다. 알루미늄 기초의 경우 기초의 무게를 더욱 줄이기 위하여 내부를 비어 있도록 하였다. 두 기초는 [그림 101]과 같이 외부 폭, 너비, 높이가 각각 10cm, 10cm, 3cm가 되도록 제작되었으며, 20g 원형수준에서 2m, 2m, 0.6m 크기의 기초로 모사될 수 있다. 최종적으로 제작된 각 기초의 질량은 알루미늄 기초, 0.545kg, 철 기초, 2.34kg이다.

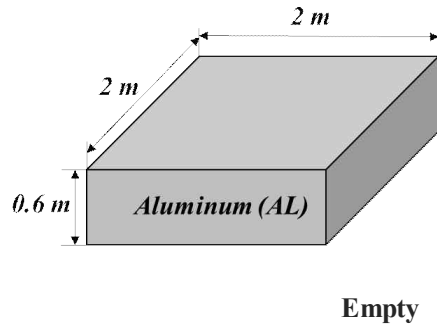


그림 101. 얇은 기초 제원

(나) 풍화토 지반 모델링

얇은기초의 회전거동은 하부지반 조건의 강성 뿐 아니라 변형률에 따른 강성감소 및 감쇠비 증가 등 비선형 특성에도 많은 영향을 받을 수 있다. 하정곤 등(2011)은 풍화토 시료에 대하여 공진주 실험을 수행하여 비선형 특성에 대하여 평가한 바 있으며, 본 실험에서는 공진주 실험이 수행된 시료와 동일한 풍화토 시료를 약 13%의 함수비로 층다짐하여 조성하였다. 조성된 모형지반의 단위중량은 1.9t/m^3 이며, 조성된 높이는 60cm로 20g 원형기준 약 12m 깊이의 지반이 모사된 것으로 볼 수 있다. 원심모형실험기의 회전 중 지반의 전단파 속도를 측정하기 위하여 깊이별로 8쌍의 벤더 엘리먼트 어레이를 설치하였다. 이를 통해서 얻어진 깊이별 전단파 속도 주상도 결과 및 평균을 [그림 102]에 나타내었다. 전체 모형 지반의 20g 중력장 조건에서 평균 전단파 속도는 약 192m/s 이며, 지반의 고유주기는 약 0.25초로 나타났다.

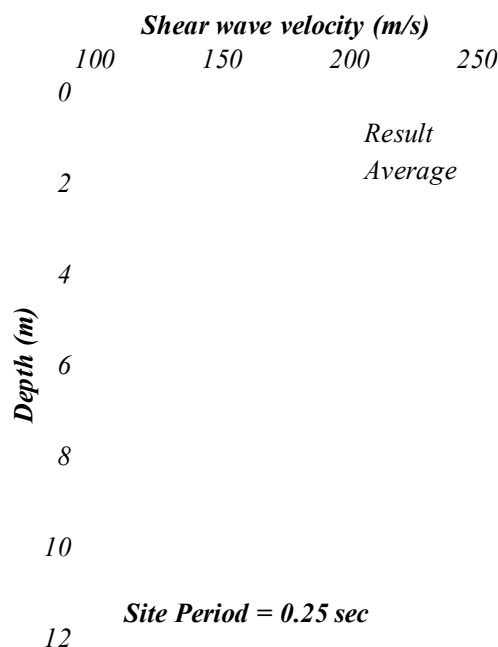


그림 102. 모형 풍화토 지반 전단파 속도 주상도

(다) 원심모형실험 단면 및 계측

[그림 103]는 원심모형실험을 수행한 모형 모델 단면과 계측 센서들을 나타내고 있다. 풍화토 지반 조성 중 각 층별로 가속도계를 매설하여 지반 증폭 현상을 확인 할 수 있도록 하였다. 그리고 기초의 수평 및 수직 가속도와 상부 단자유도 구조물의 가속도를 측정하기 위하여 가속도계를 부착한 후에 풍화토 지반에 설치하였다. 추가적으로 기초 저면에는 토압계를 부착하였으며, 기초의 양 끝단에는 수직 침하계를 설치하였다. 알루미늄 기초와 철 기초 모두에 동일한 위치에 센서를 설치하고 동시에 실험을 수행하였다. 지진 시, 알루미늄 얇은기초와 철 얇은기초 시스템의 상호작용을 방지하기 위하여, [그림 103]의 우측 하단의 실험모델 상면도에 나타낸 바와 같이 진동방향에 직각 방향으로 기초-구조물 시스템을 설치하였다. 원심모형실험은 원심가속도 20g 수준에서 진행되었으며, 입력 지진파로는 Hachinohe, Ofunato, Northridge 등 실지진파 계측기록을 이용하였으며, 최대 가속도 수준을 변화시켜가며 약한 지진부터 강한 지진까지 입력하였다.

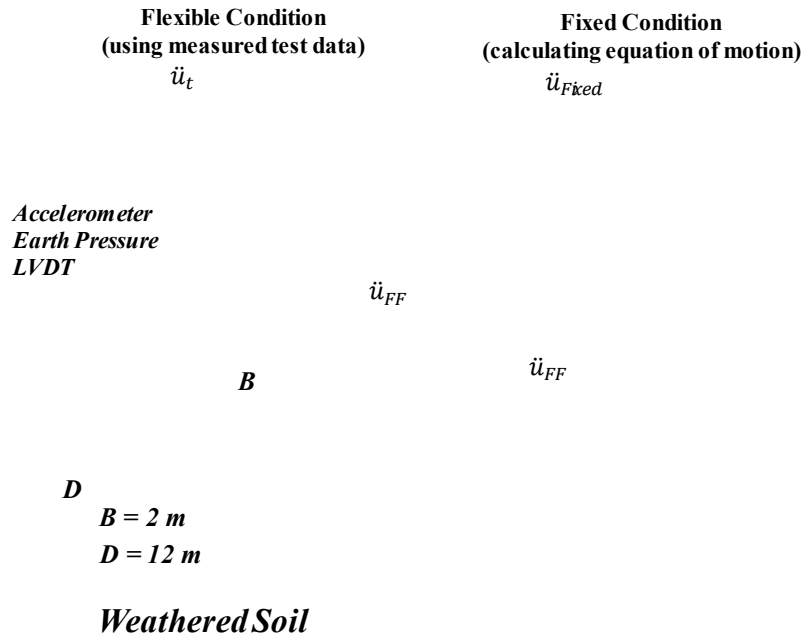


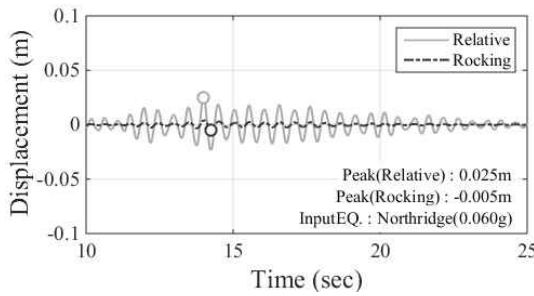
그림 103. 원심모형실험 단면

(2) 풍화토 지반에서 얇은 기초의 지진 시 거동 평가 결과

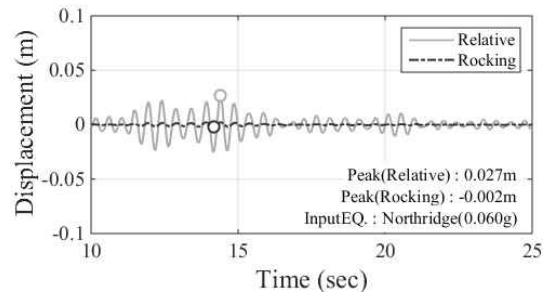
(가) 구조물 지진하중 평가

[그림 104 - (a)]는 Northridge 지진이 최대가속도 약 0.060g로 입력되었을 때의 계측 결과이다. 구조물의 기초의 회전으로 인한 변위의 최대값(절댓값)이 알루미늄 기초와 철 기초 시스템 모두 0.005m이하로 거의 발생하지 않았으며, 구조물의 상대변위도 각각 0.025m와 0.027m로 유사하게 나타났다. 이는 시스템에 가해진 지진 하중의 크기가 작아서, 지반-기초-구조물 상호작용의 효과가 구조물의 거동에 큰 영향을 미치지 않고 구조물 특성에 따라 응답이 결정되었기 때문이다.

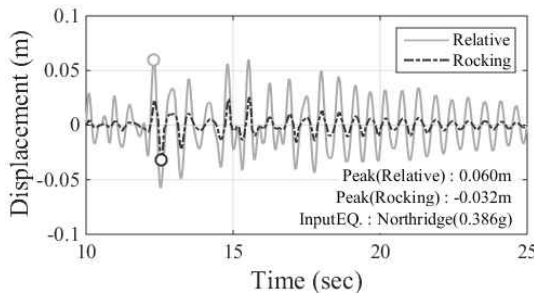
반면 [그림 104 - (b)]에서는 기반암 최대 가속도가 0.386g로 매우 큰 강진이 입력되었을 때 응답들을 보여주고 있다. 구조물의 상대변위의 최댓값은 알루미늄 기초의 경우에 0.060m로 철 기초의 경우보다 작게 나타났다. 하지만 기초 회전에 의한 구조물의 변위는 알루미늄 기초 시스템에서 0.032m로 철 기초 시스템의 0.025m 보다 크게 나타났다. 이러한 차이는 지진 하중의 세기가 증가하여 구조물 거동에 미치는 지반-기초-구조물 상호작용의 영향이 증가하였기 때문으로, 기초의 질량이 감소할 경우 지진 시 회전거동이 잘 유발 될 수 있음을 보여준다.



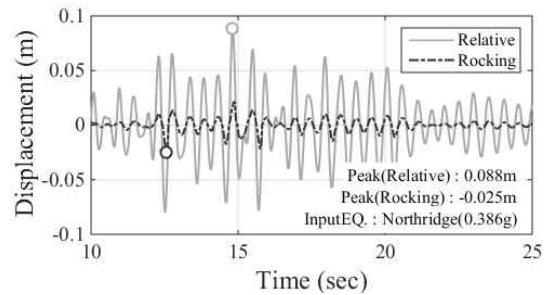
(a-1) FND(AL)



(a-2) FND(ST)



(b-1) FND(AL)



(b-2) FND(ST)

그림 104. 구조물의 기초 대비 상대 변위 및 기초 회전 거동에 의한 변위

[그림 105]은 고정단 거동과 유연한 거동의 변위 시간이력을 Northridge 지진과 기반암 가속도의 증가에 따라서 나타내었다. 기반암 가속도가 0.060g일 때는 [그림 104]에서 나타난바와 같이 알루미늄 기초와 철 기초 모두 0.021m와 0.025m로 고정단 거동의 0.022m와 매우 유사하게 나타났다. 그러나 기반암 가속도가 0.143g인 [그림 105 - (b)]에서부터 차이가 나타나기 시작하였다. 알루미늄 기초의 경우에 유연한 거동이 약 0.027m로 고정단 거동의 최댓값 0.040m에 비하여 작게 나타났으나, 철 기초의 경우에는 0.047m로 고정단 거동과 유사하게 나타났다. 이는 가벼운 알루미늄 기초의 회전에 대한 저항이 작기 때문에 약 0.143g의 기반암 가속도 입력 시에도 기초의 회전거동이 유발되었지만, 무거운 철 기초는 기초 회전이 작기 때문에 나타나는 현상이다. 입력 지진 하중이 0.2g를 넘어가는 [그림 105- (c), (d)]에서는 고정단 거동과 유연한 거동의 차이가 명확히 구분된다. 유연한 거동이 기초의 종류에 관계없이 고정단 거동에 비해서 작게 나타나며, 철 기초의 유연한 거동이 알루미늄 기초의 유연한 거동 보다 크게 발현되었다.

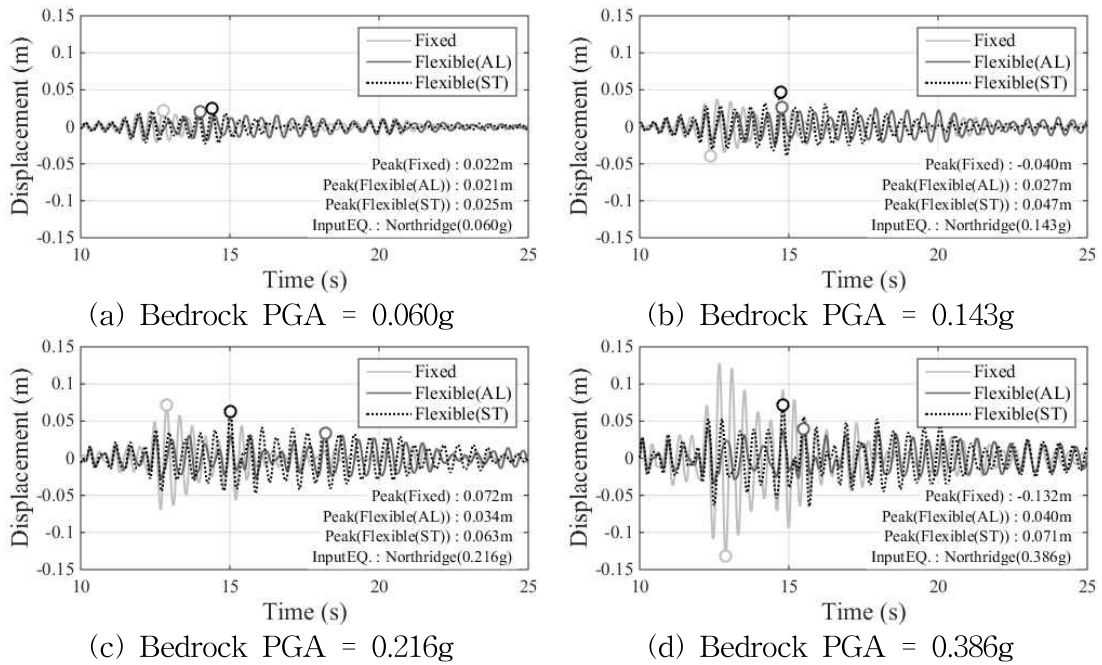


그림 105. 고정단 거동 및 유연한 거동 시간이력 비교

모든 원심모형실험 결과들의 입력 지진하중 수준에 따른 변화를 보기 위하여 [그림 106]과 같이 가로축을 고정단 기초 지진 하중의 최대값, 세로축을 유연한 기초 지진 하중의 최대값으로 한 그래프를 도출하였다. 입력 지진 하중이 작아서 고정단 거동이 0.7g 이하로 작게 발현될 때는 유연한 거동의 크기가 고정단 거동과 유사하며, 1:1 선상에 결과가 분포하고 있다. 이는 지반-기초-구조물 상호작용의 영향이 작아서 상부 단자유도 구조물의 지진하중에 큰 변화가 일어나지 않기 때문이다. 알루미늄 기초 시스템의 결과는 고정단 거동이 0.7g를 넘어서면 유연한 거동이 줄어들지만, 무거운 철 기초 시스템은 회전에 대한 저항이 크기 때문에 고정단 거동과 유연한 거동의 결과가 고정단 구조물의 크기가 약 1.4g가 될 때까지 유사하게 나타났다.

입력 지진하중의 크기가 커질수록 지반-기초-구조물 상호작용에 의한 구조물 지진하중의 차이는 뚜렷하게 나타난다. [그림 106]에서 점선으로 표시된 두 개의 선은 식 (8)에 의해서 구해진 각각 알루미늄 기초와 철 기초 위 단자유도 구조물의 최대 지진하중($S_{a,max}$)이다. 고정단 거동은 입력지진하중의 크기가 증가함에 따라서 지속적으로 증가하지만 유연한 거동은 점선을 따라서 최대 지진 하중 값으로 수렴하게 된다. 점선으로 표시된 제한 값보다 크게 나타난 결과들은 지진 시 기초의 감쇠효과에 의한 것으로, 그 경우에도 고정단 거동에 비해서 현저히 작은 값을 보인다(김동관 등, 2014). 즉, 얇은 기초의 회전이 허용되게 되면 매우 큰 지진이 발생하더라도 일정한 값 이상의 지진하중이 구조물에서 발현되지 않기 때문에 구조물의 안정성을 확보할 수 있다. 본 실험에서 수행된 원심모형실험 결과를 통해서 풍화토 지반에서도 사질토 및 점토 지반에서 수행된 선행연구와 같이 기초 회전에 의해서 상부 구조물의 지진하중이 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인하였다. 이는 국내에 넓게 분포하고 있는 풍화토 지반에서도 기초 회전 거동을 이용하는 내진설계의 가능성을 보여준다. 그러나 기초 회전거동을 이용한 설계는 입력 지진하중이 강할 때 지진 하중 저감 효과가 크게 나타나므로, 지진 중약진 대역인 국내 적용 시 경제성은 보완 연구를 통해서 확인할 필요가 있다고 판단된다.

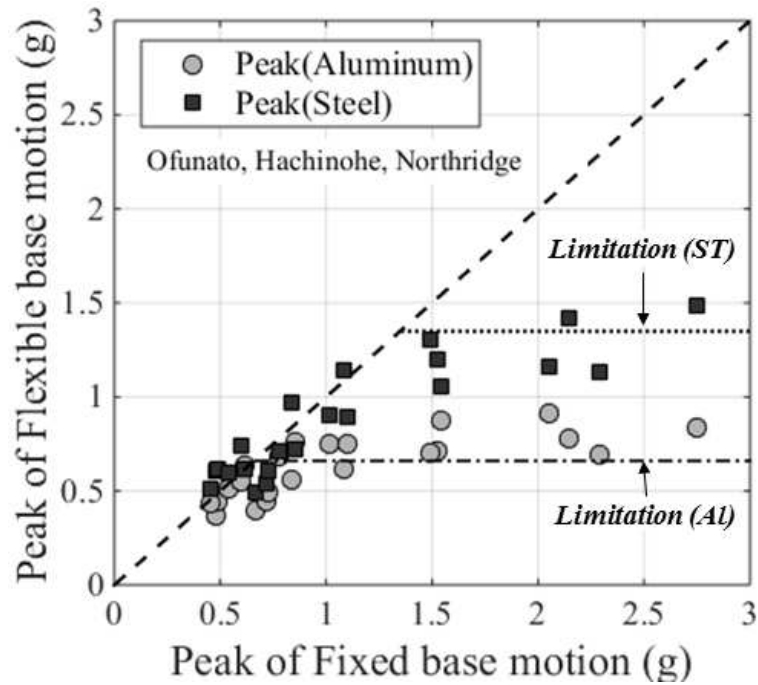


그림 106. 고정단 거동 및 유연한 거동의 최댓값 비교

(나) 기초 회전각 대비 구조물 전도 모멘트 이력곡선

지진 시 얇은기초의 회전 정도와 그에 상응하는 단자유도 구조물의 전도 모멘트를 확인하기 위하여 [그림 107]와 같이 기초의 회전각 대비 구조물 전도 모멘트 이력곡선을 지진하중의 크기에 따라서 나타내었다.

[그림 107 - (a)]는 기반암 가속도가 0.06g로 작은 지진 하중이 입력되었을 때의 결과로 두 기초 시스템의 이력곡선이 모두 선형적으로 나타나며, 이력 곡선 내부의 면적이 매우 작다. 이는 기초의 회전에 의한 지진 에너지의 소산, 즉, 회전에 의한 감쇠비가 작은 것으로, 앞선 결과들과 동일하게 약진에서는 지반-기초-구조물 상호작용에 의한 지진 에너지 저감이 크지 않은 것을 알 수 있다. 입력 지진 하중이 증가할수록 이력곡선 내분의 면적이 증가하고 곡선의 기울기가 감소하며 비선형 거동을 보이게 된다. 그리고 전도 모멘트의 최댓값은 식 (6)에서 구해진 시스템의 최대지지 모멘트를 크게 상회하지 않는 결과를 나타낸다.

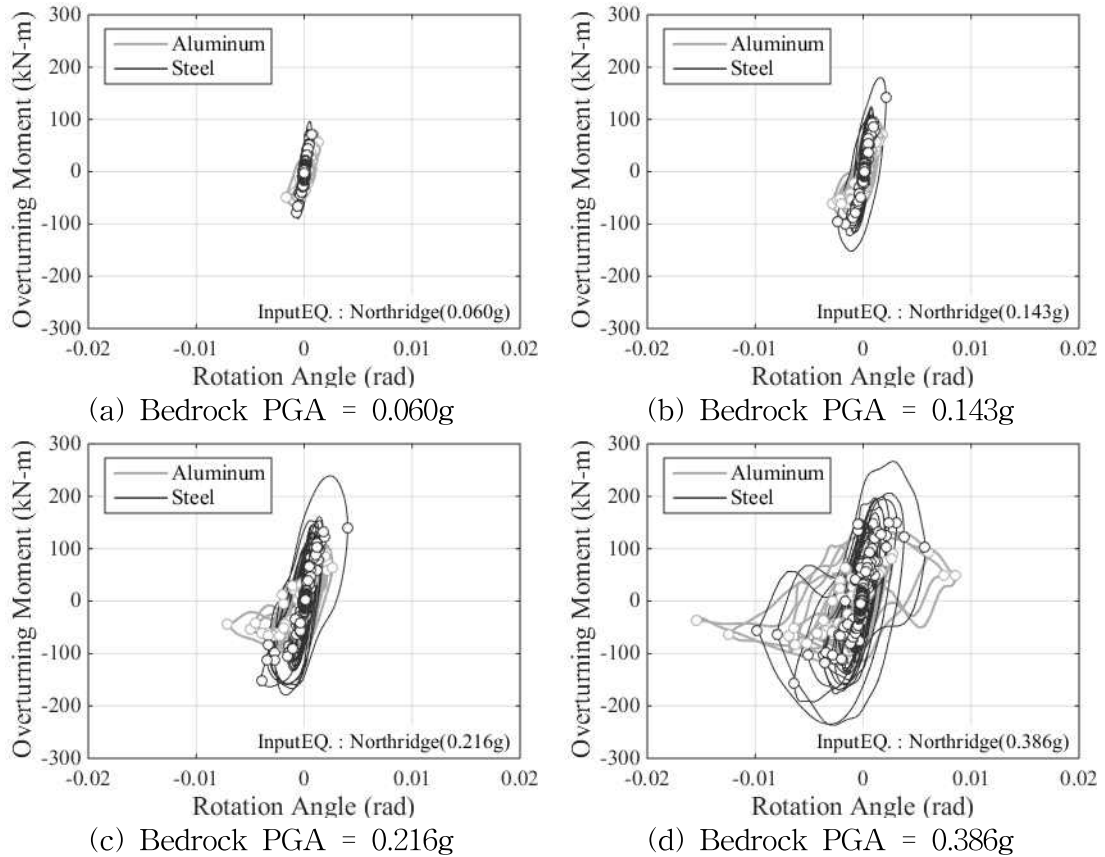


그림 107. 입력 지진하중 세기에 따른 회전각 모멘트 커브

기초 회전각에 따른 회전강성 및 감쇠비의 변화는 기초의 회전 거동을 이용한 내진 설계를 위해서 중요한 변수이다 (Deng 등, 2014; Paolucci 등, 2013; Kutter 등, 2016). 따라서 풍화토 지반에서 얇은기초의 회전 거동 특성을 모든 입력 지진 기록에 대해서 정량적으로 평가하기 위하여, 각 가진 기록의 회전각-전도 모멘트 이력곡선에서 기초의 회전각 대비 회전 강성과 감쇠비를 구하여 [그림 108]과 [그림 109]에 도시하였다. 얇은 기초 시스템의 초기 회전강성은 가벼운 얇은 기초의 경우 약 80MNm, 무거운 철 기초의 경우 약 140MNm로 기초의 무게가 무거울수록 초기 강성이 크게 발현되는 것을 알 수 있으며, 이는 앞서 고찰된 실험결과들과 동일한 결과이다. 또한 입력 지진 하중이 증가함에 따라서 기초의 회전각이 커지게 되며, 회전 강성이 지속적으로 감소하여 약 10 - 20 MNm 에서 수렴하게 되지만, 동일한 지진 하중에서는 여전히 무거운 기초 일수록 회전 강성이 크게 나타난다.

[그림 109]에 나타났듯이 기초 회전각의 증가에 따라서 회전에 의한 시스템의 감쇠비는 약 0.2에서 0.4 - 0.6까지 증가하였다. 전반적으로 알루미늄 기초가 철 기초에 비해서 큰 감쇠비를 보여주었으며, 값의 차이는 기초의 회전각이 작을 때는 0.05이하로 작았지만 기초의 회전각이 0.008rad를 넘어서면서 0.1이상 크게 나타났다.

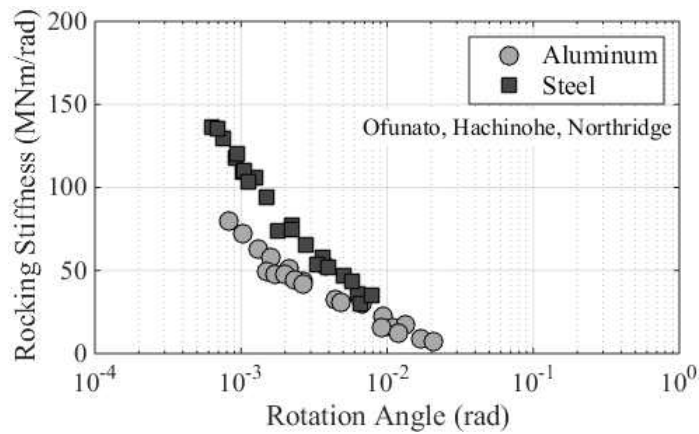


그림 108. 회전각 대비 회전 강성 변화

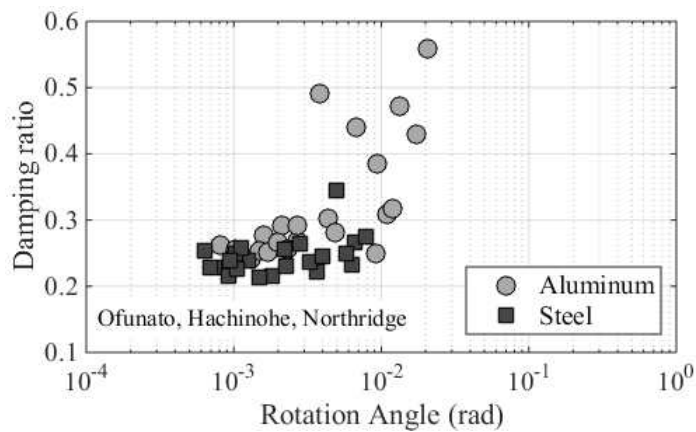


그림 109. 회전각 대비 감쇠비 변화

(나) 시스템의 지진 시 침하 특성 평가

얕은기초의 회전 운동은 지진에너지를 소산시키면서 상부 구조물의 지진하중이 제한되는 이점이 있으며, 앞 절까지의 원심모형실험 결과를 통해서 풍화토 지반에서도 기초의 회전거동에 의한 상부 구조물의 지진하중 저감현상을 확인하였다. 그러나 기초의 회전 거동이 발현될 경우, 기초 하부 지반의 항복에 의해서 침하가 발생할 수 있기 때문에 설계 및 시공 전에 이에 대한 면밀한 평가가 필요하다.

동적 원심모형실험을 통해서 계측된 기초의 침하 패턴을 보기 위해서 [그림 110]에 Northridge 지진이 가해졌을 때, 입력 지진 하중의 크기에 따른 회전각-기초 침하 관계를 나타내었다. 지진 하중이 작을 때는 회전각과 침하량 모두 매우 작게 나타났으며, 입력 지진 하중이 증가할수록 기초의 회전각이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 지진 시, 회전각이 커짐에 따라 기초의 침하는 지반 아래로 침하가 일어나지 않고, 지반 위로 올라가는 현상이 주로 발생하였다. 이는 하부 풍화토 지반의 지지력이 상대적으로 크기 때문에 기초가 지반 아래로 파고드는 현상보다는 한쪽 모서리를 기준으로 기초-구조물 시스템이 회전하면서 들리는 들뜸 현상(Uplift)이 지배적으로 일어나기 때문이다(Gajan et al. 2008, Deng et al, 2012). 따라서 지진이 발생하는 도중에 기초의 들뜸현상이 일어날 뿐 기초의 영구 침하는 거의 발생하지 않게 된다. 기초의 지진 시 들뜨는 변위의 최대값은 기반암 가속도가 0.386g일 때, 알루미늄 기초에서 0.015m, 철 기초에서 0.008m로 매우 작게 나타났다.

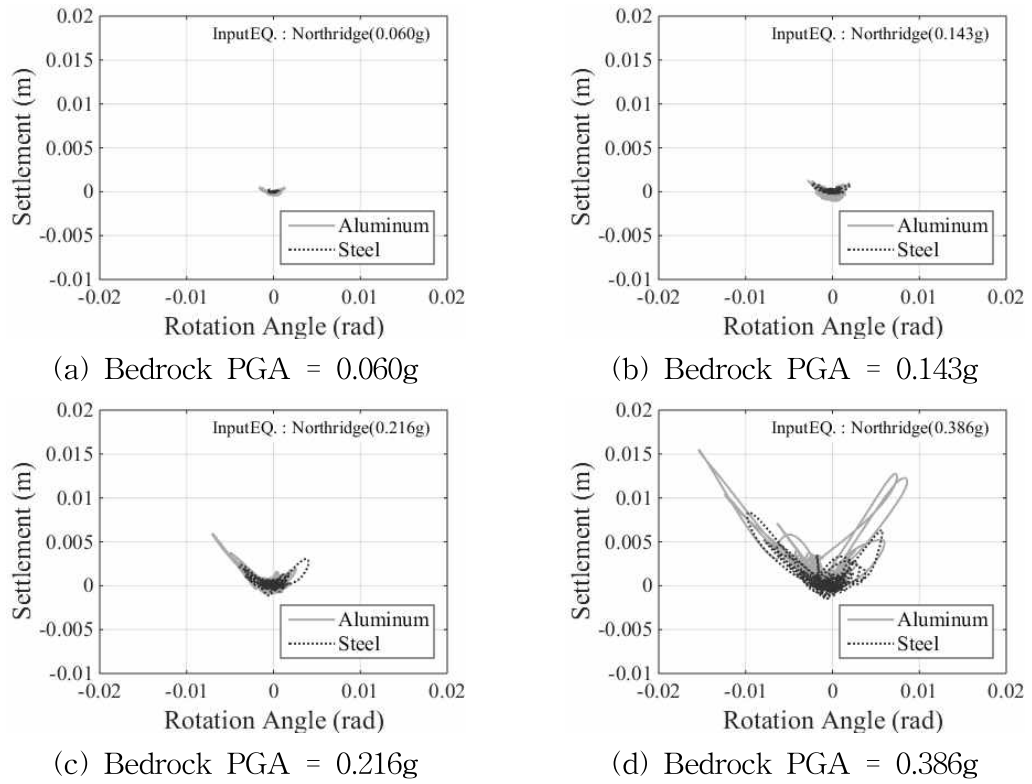


그림 110. 기초 회전각 대비 기초 침하량 변화

모든 지진 하중에 대한 기초 시스템의 영구침하를 보기 위해서 기반암 가속도 수준에 대한 정규화 영구 침하를 [그림 111]에 나타내었다. 정규화 영구 침하는 기초의 지진 시 영구 침하를 기초의 폭으로 나누어 준 결과를 의미한다. 대부분의 정규화 영구 침하는 0.5%이하의 값을 보여 풍화토 지반 위에 놓인 얇은 기초의 회전 운동에 의한 기초의 침하는 매우 작은 것을 알 수 있다. 이는 Gajan 등(2008)에서 수행된 사질토 지반에서의 지진 실험 결과(최대 약 1%)에 비해서 작은 값으로 풍화토 지반에서 기초의 회전거동을 이용한 설계가 이점이 있음을 보여주었다. 하지만 본 연구 결과는 하나의 풍화토 지반에만 수행되어, 제한적인 실험 결과로 추후 다양한 조건에 대한 검증은 통해서 보완될 필요가 있다.

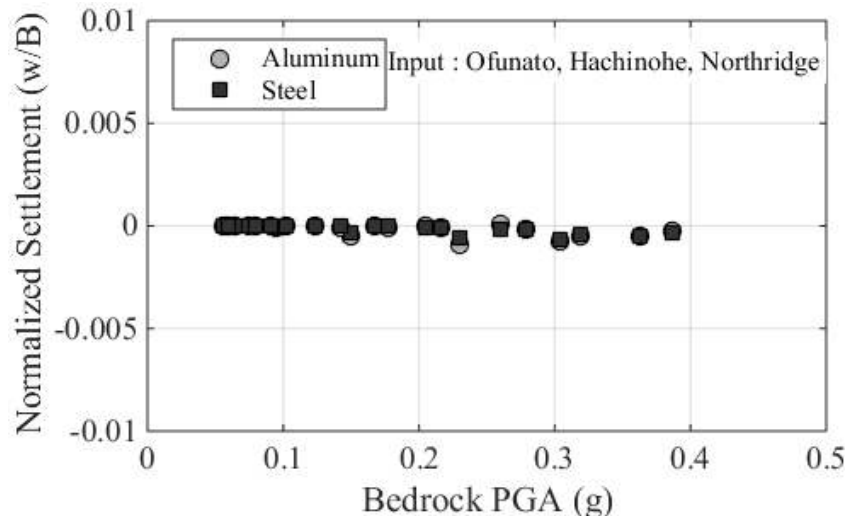


그림 111. 입력 지진 하중 세기에 따른 기초의 정규화 침하 패턴 비교

나. 풍화토 지반에서 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 거동 평가

(1) 원심모형실험 모델링

(가) 실험 모델 제작 및 단면

[그림 112]은 풍화토 지반에 대한 기초 항복 거동 평가를 위한 동적원심모형실험 모델링 과정을 나타내고 있다. 흔히 현장에서 풍화지반은 성토재료나 기초지반으로서 양호하다고 인정되고 있으나 조성광물의 함유량과 풍화의 정도에 따라 공학적 성질이 크게 달라지는 형태를 보이고 있다. 본 연구에서는 현장에서 채취한 풍화토 지반의 강성 증대를 위해 지름 5mm 내외의 자갈을 풍화토와 자갈의 질량비 9:1의 비율로 섞어 하부 풍화토 지반 재료를 제작하였다.

지반 조건과 함께 기초의 조건도 국내에서 가장 널리 이용되는 말뚝 기초 형태에 초점을 맞추어 실험을 수행하였다. 말뚝 기초 및 말뚝 캡은 앞 장에서 수행된 말뚝 결합 유무에 따른 지진하중 평가에서 사용된 재원을 따라서 제작 되었다. [그림 112-(b), (c)]와 같이 말뚝을 박스 하단에 선단지지 형태로 고정 시킨 후 미리 조성한 풍화토 지반 재료를 넣고 최대 다짐으로 하부 지반을 조성하였다. 최종적으로 조성된 풍화토 지반의 평균 전단파 속도는 약 350m/s 이다. 하부 지반을 조성한 이후에 말뚝캡을 설치하고, 최종적으로 앞서 이용되었던 단자유도 구조물을 올려놓고 동적 원심모형실험을 수행하였다. [그림 113]는 수행된 동적 원심모형실험 단면이다.



(a) 기초 지반 조성



(b) 말뚝 기초 설치



(c) 하부 지반 조성



(d) 말뚝캡 설치

그림 112. 실험모형 제작 과정

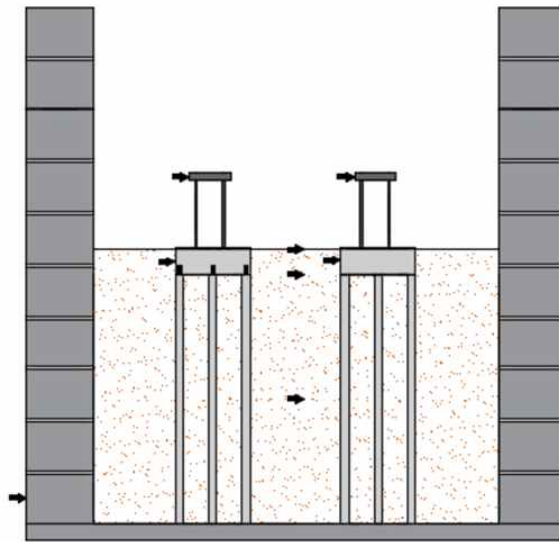


그림 113. 동적원심모형실험 단면

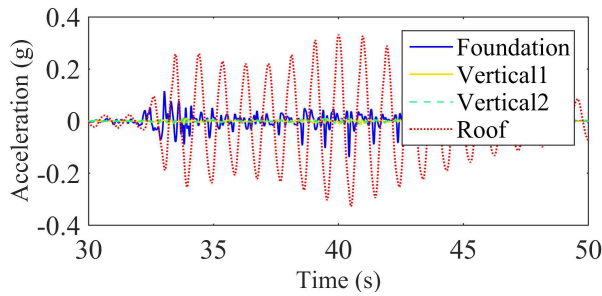
표 16. 풍화토 지반에서 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 거동 평가 실험

Soil Type	기초	실험	No. of Structure
풍화토	Disconnected (FND1) & Connected (FND2)	단자유도	SDOF 1
			SDOF 2
			SDOF 3
		다자유도	MDOF 1
			MDOF 2

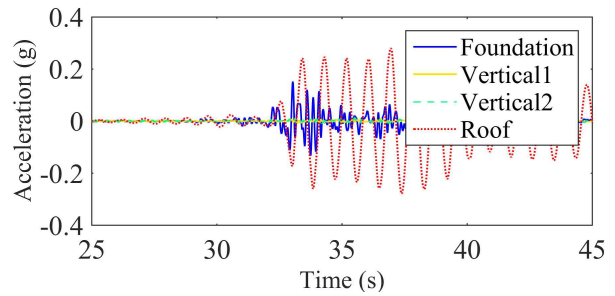
(2) 원심모형실험 결과 분석

(가) 기초 및 구조물 측정 가속도

말뚝기초 캡 및 단자유도 구조물의 측정 가속도 시간이력을 기반암 가속도 크기에 따라서 [그림 114 - 116]에 도시하였다. 분리 말뚝 기초(FND1)의 경우에는 기반암 가속도가 작은 [그림 114]에서는 결합 말뚝 기초(FND2)와 같이 단자유도 구조물 지붕에서 증폭이 발생하였으나, 기반암 가속도가 0.14g로 커질 때부터는 기초의 수직응답이 커지면서 단자유도 구조물의 증폭은 감소하고 있다. 그리고 기반암 가속도가 0.2g를 넘어가게 되면 구조물 수직 가속도가 단자유도 구조물의 가속도의 2배이상 커졌다. 그러나 결합 말뚝 기초(FND2)의 경우에는 기반암 가속도의 크기에 관계 없이 기초의 수직 가속도는 거의 나타나지 않으며, 구조물 지붕의 증폭은 지속적으로 나타났다.

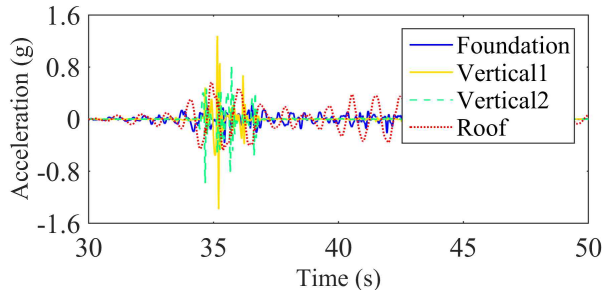


(a) FND1

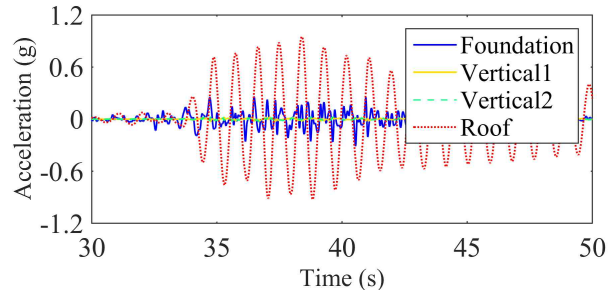


(a) FND2

그림 114. 기초 및 상부구조물 측정가속도 (Hachinohe - No.22 - PGA : 0.0585 g)

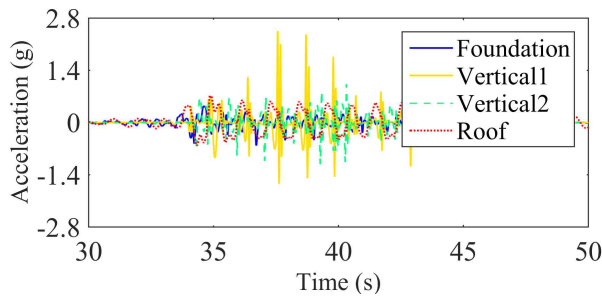


(a) FND1

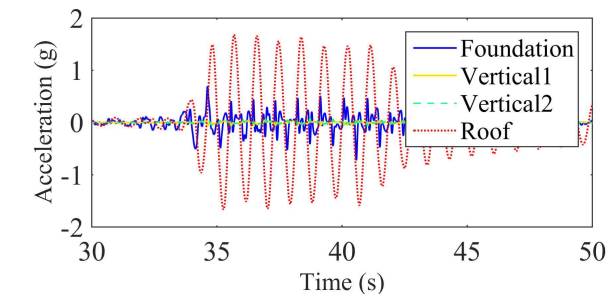


(a) FND2

그림 115. 기초 및 상부구조물 측정가속도 (Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1360 g)



(a) FND1



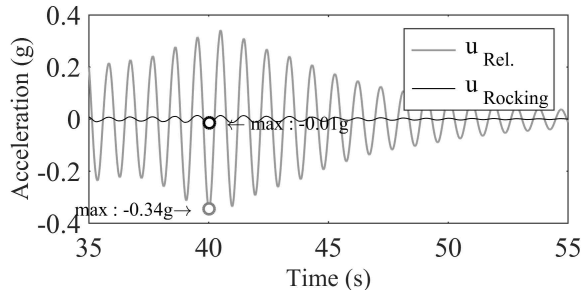
(a) FND2

그림 116. 기초 및 상부구조물 측정가속도 (Hachinohe - No.29 - PGA : 0.2737 g)

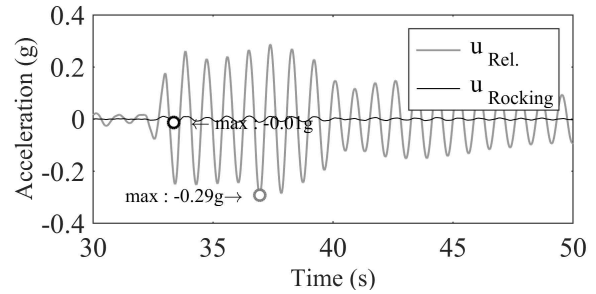
(나) 기초 대비 구조물 상대 거동 및 기초 회전에 의한 구조물 거동

말뚝 캡의 움직임을 전체 구조물의 거동에서 감하여 구해진 기초 대비 구조물의 상대 거동과 기초의 회전에 의해서 유발되는 구조물의 거동 시간이력을 [그림 117 - 119]에 나타냈다. 앞 절에서 관찰한 바와 같이 결합 말뚝 기초(FND2)에서는 기초의 회전이 유발되지 않으므로 이에 따른 구조물의 거동도 거의 나타나지 않았다.

그러나 분리 말뚝 기초(FND1)의 경우에는 기반암 가속도가 증가함에 따라서 기초 회전 거동에 따른 구조물의 거동이 증가함을 볼 수 있다. 특히 [그림 119-(a)]를 보게 되면 회전 거동에 의한 구조물의 움직임이 약 10초간 지속적으로 크게 나타난다. 또한 기초대비 구조물의 상대 가속도의 위상이 기초의 회전 거동이 커지면서 달라진다. 기반암 가속도가 작은 경우에는 기초의 진동에 의해서 구조물의 응답이 나타나게 되고 이후에 자유진동이 지속적 형태를 나타낸다. 그러나 기반암 가속도가 증가하게 되면 기초의 회전 거동이 크게 나타나는 순간 이후에는 기초 대비 구조물 거동이 급격히 감소한 이후에 다시 응답이 커지고 자유진동이 나타난다. 이는 기초의 회전에 의해서 하중이 급격히 감소하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

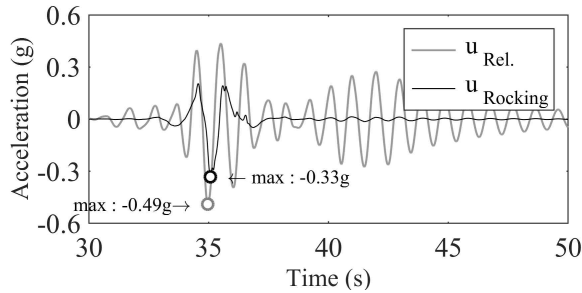


(a) FND1

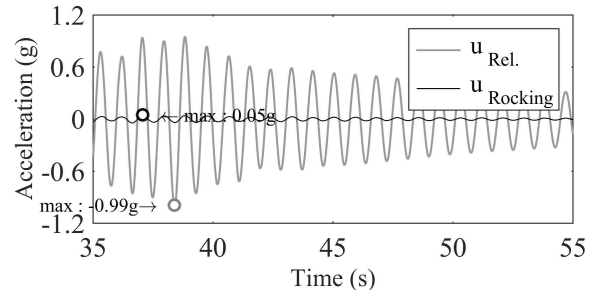


(a) FND2

그림 117. 기초 대비 상대 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.22 - PGA : 0.0585 g)

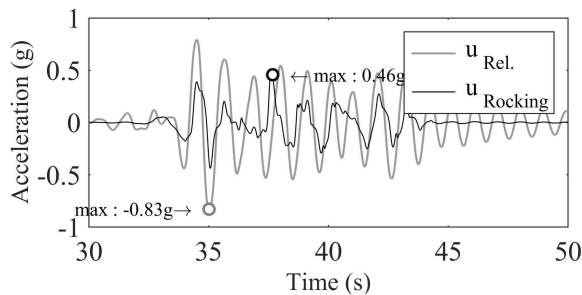


(a) FND1

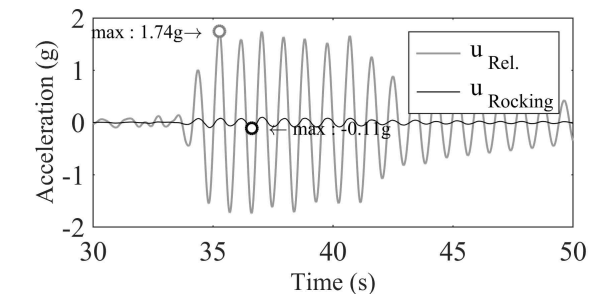


(a) FND2

그림 118. 기초 대비 상대 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1360 g)



(a) FND1



(a) FND2

그림 119. 기초 대비 상대 가속도 시간이력 (Hachinohe - No.29 - PGA : 0.2737 g)

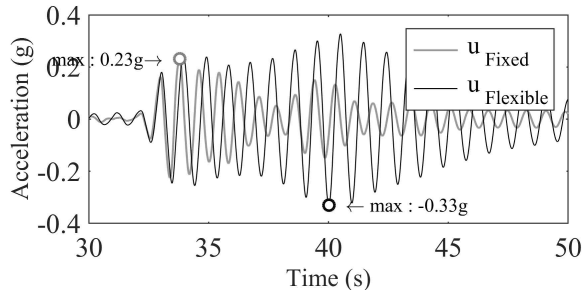
(다) 고정단 기초 거동과 유연한 기초 거동

[그림 120 - 122]은 현행 설계 기준과 같은 고정단 기초 거동과 실제 측정된 유연한 기초 거동에 대한 시간이력 해석 결과이다. 4장의 말뚝기초 실험결과와 같이 말뚝 결합 기초(FND2)는 고정단 거동과 유연한 거동이 기반암 가속도 수준에 관계없이 유사하게 나타나고 있다. 반면에 말뚝 분리 기초는 고정단 거동 대비 유연한 거동의 비는 점점 감소하고 있다.

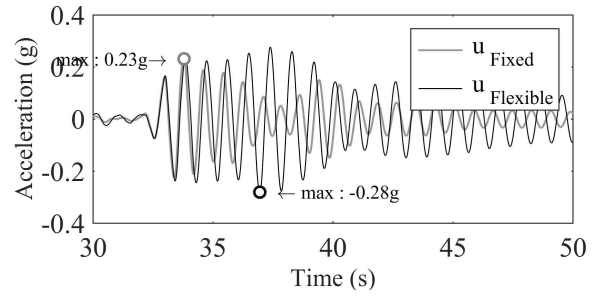
지진과 종류와 세기에 따른 변화를 보기위하여 모든 실험 결과에 대한 고정단 거동과 유연한 거동의 최댓값을 [그림 123]에 도시하였다. 하부 지반 조건이 강성이 큰 풍화토 지반임에도 불구하고 분리 말뚝 기초 위 구조물의 지진하중은 일정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

즉, 하부지반의 강성이 증가하더라도 전면 기초(말뚝 캡)의 움직임이 허용된다면 기초의 회전 거동이 발생하며 이로 인한 항복 거동이 발현될 수 있다. 그리고 항복 거동이 발현되게 되면 상부 구조물의 지진하중은 현행 설계법에서 제시하는 고정단 기초 거동에

비해서 감소할 수 있다. 단, 실제 설계 적용 및 기술 개발을 위해서는 강성이 큰 풍화토 지반 및 좀 더 다양한 형태의 기초에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.



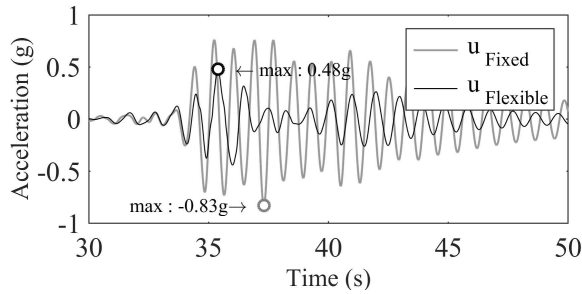
(a) FND1



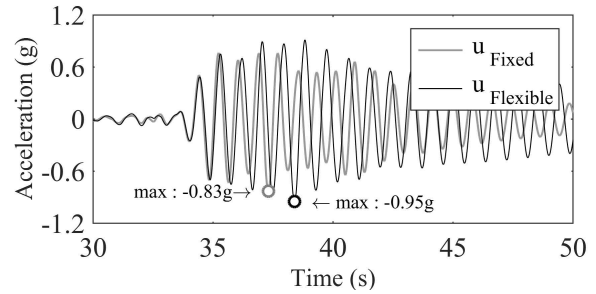
(a) FND2

그림 120. 고정단 거동과 SFSI가 고려된 유연한 거동 비교

(Hachinohe - No.22 - PGA : 0.0585 g)



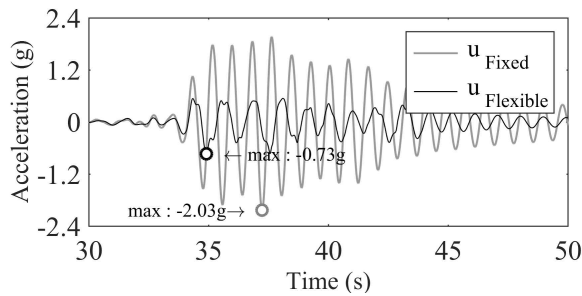
(a) FND1



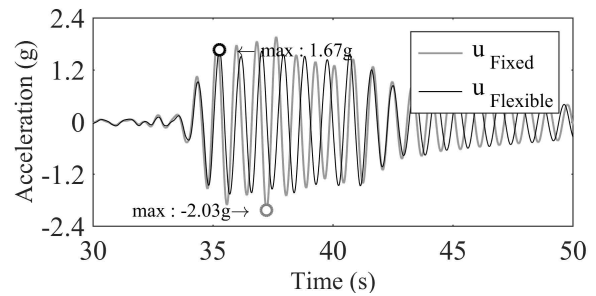
(a) FND2

그림 121. 고정단 거동과 SFSI가 고려된 유연한 거동 비교

(Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1360 g)



(a) FND1



(a) FND2

그림 122. 고정단 거동과 SFSI가 고려된 유연한 거동 비교

(Hachinohe - No.29 - PGA : 0.2737 g)

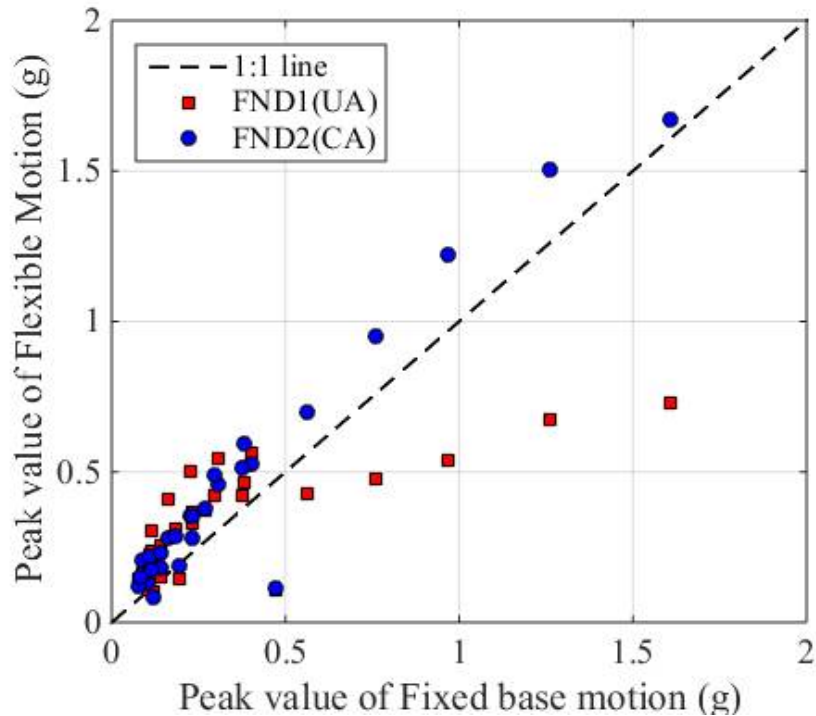
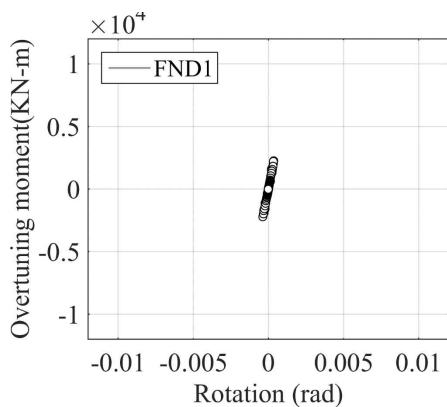


그림 123. 고정단 기초 거동과 SFSI가 고려된 유연한 기초 거동 최대값 비교

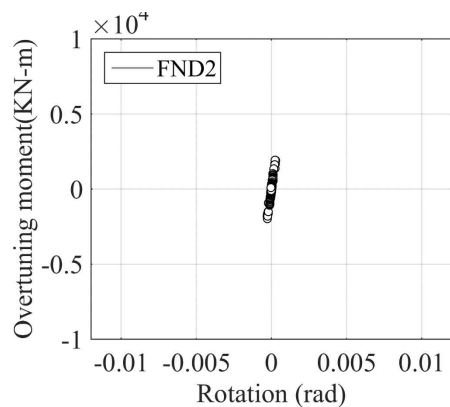
(라) 기초 회전각 및 구조물 전도모멘트 관계

기초-구조물 시스템이 기초 저면에 유발하는 전도 모멘트와 기초의 회전각 사이의 관계를 [그림 124 - 126]에 이력곡선의 형태로 도시하였다. 단자유도 구조물 3에 대한 원심모형실험에서 앞 절에서 언급하고 있는 Hachinohe 지진을 하중 단계별로 가진 하였을 때 나타난 결과를 나타내었다.

풍화토 지반에서도 느슨한 사질토 지반과 유사한 경향이 관찰되었다. 즉, 풍화토 지반에서도 기반암 가속도 크기의 증가에 따른 비선형 거동과 에너지 감쇠 현상이 모두 발생되었다. 이는 앞 절에서 명시된 최대 지진 하중의 제한과 함께 회전 기초에 의한 지진 안정성 확보 및 경제적 내진 설계 개념을 풍화토 지반에서도 충분히 이용 가능할 수 있음을 보여주고 있다.

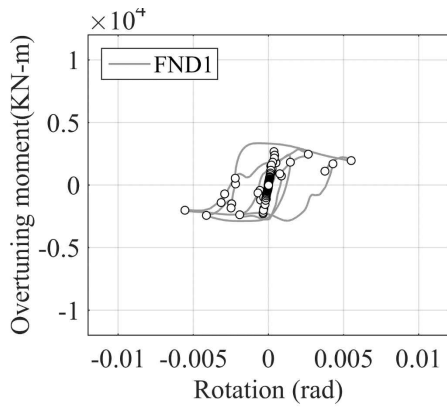


(a) FND1

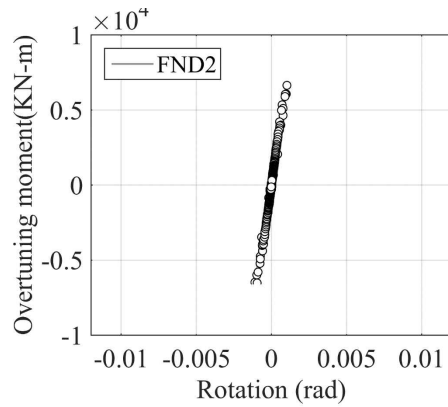


(a) FND2

그림 124. 기초 회전 각과 전도 모멘트 관계 (Hachinohe - No.22 - PGA : 0.0585 g)

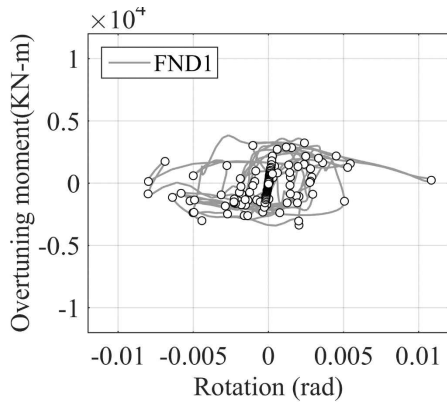


(a) FND1

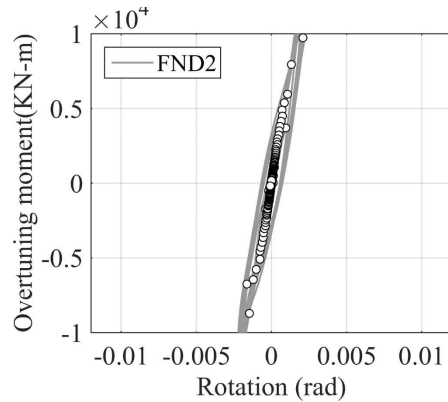


(a) FND2

그림 125. 기초 회전 각과 전도 모멘트 관계 (Hachinohe - No.26 - PGA : 0.1360 g)



(a) FND1



(a) FND2

그림 126. 기초 회전 각과 전도 모멘트 관계 (Hachinohe - No.29 - PGA : 0.2737 g)

다. 소 결

“풍화토 지반에서의 기초 하부 지반 항복 거동 적용성 평가“ 연구를 수행한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

● 풍화토 지반에서도 구조물의 유연한 거동은 지속적으로 증가하는 고정단 거동과 달리 최대 지진하중으로 수렴하는 현상을 보였으며, 이는 사질토에서 수행된 선행 연구 결과와 동일함.

● 지진 시, 풍화토 지반 위에 놓은 얇은 기초의 회전각-침하 특성은 지반 아래로 침하하는 현상보다는 기초가 들리는 들뜸현상이 지배적으로 나타나며, 기초의 영구 침하하는 기초폭의 0.5%이하로 작게 나타남.

● 풍화토 지반에서도 비결합 말뚝 기초가 전면기초의 회전운동이 허용됨으로 결함 말뚝기초에 비해서 상부 구조물의 지진하중을 확실히 줄여주는 장점을 확인함.

● 풍화토 지반의 경우 상대적으로 적은 침하량이 발생하였으며, 기초 회전에 의한 지진하중 저감 효과는 동일하게 나타나므로 국내에 가장 널리 분포하고 있는 풍화토 지반에서 기초 항복 거동을 이용한 경제적인 기초 설계 가능성을 확인함

4. 항복거동을 이용하는 신개념 기초 설계 형태 제안 및 검증

최근 수십 년간 얇은 기초의 항복거동에 관한 연구들은 다양하게 진행되었으며, 항복거동으로 인한 기초 하부지반의 영구 침하를 감소시키는 방법 또한 다양하게 연구되었다. Gajan 등 (2008)은 얇은 기초의 회전거동 시 기초면적과 임계 접촉 면적 비(A/A_c)에 따른 영구 침하 관계를 보였고, Anastasopoulos 등 (2012)는 기초 하부지반 개량을 통해 회전 거동 시 기초의 영구 침하를 감소시킬 수 있음을 보였다. 한편 Deng 등 (2011)은 얇은 기초 지반하부에 설치된 콘크리트 Pad가 얇은 기초의 회전거동 시 기초의 영구 침하를 감소시킬 수 있음을 보였는데, 본 연구에서는 해당 결과를 착안하여 동일한 지반조건에서 Pad를 이용한 다양한 기초형태를 통해 얇은 기초의 회전거동에 따른 지반의 영구 침하를 감소시키는데 초점을 맞추었다. 다양한 기초형태 뿐만 아니라 구조물 모형의 높이를 달리하여 기초 및 구조물 시스템의 세장비에 따른 회전 거동 특성 또한 관찰하였다. 항복거동을 이용한 얇은 기초의 개선된 형태를 개발하는 연구 흐름은 [그림 127]와 같다.



그림 127. 항복거동을 이용한 얇은 기초의 개선된 형태 제안을 위한 연구 흐름

가. 느린 수평반복하중 실험을 통한 개선된 형태의 얇은 기초 회전거동 특성 평가

최근 수십 년간 느린 수평반복하중 실험은 얇은 기초의 회전거동 특성을 효과적으로 평가할 수 있는 실험으로 검증되었다. 따라서 본 연구에서는 동적 원심모형실험에 앞서 느린 수평반복하중실험을 개선된 형태의 다양한 얇은 기초에 대하여 수행하였다.

(1) 개선된 형태의 얇은 기초 모형 제작

[그림 128]은 Gajan 등 (2008)이 얇은 기초의 정규화 된 극한 모멘트하중을 A/A_c 에 따른 변화로 나타낸 것이다. A/A_c 는 기초의 면적 대비 기초의 임계 접촉면적의 비로서 기초의 수직안전율(FS_v)에 비례한다. 즉 A/A_c 값의 증가는 보수적인 설계와 가까워지는 것을 의미하며, 이는 지진 시 얇은 기초의 회전거동으로 인한 지반변형을 감소시킨다. 이와 반대로 A/A_c 값이 작아지는 것은 “회전 기초(Rocking Foundation)” 설계기법에 가까워지는 것을 의미하며, 정규화 된 극한모멘트 하중이 작아지는 것은 지진 시 얇은 기초가 회전거동으로 인해 많은 지반변형을 야기한다는 것을 의미한다. 즉, A/A_c 가 10인 기초는 얇은 기초가 가질 수 있는 최대 극한모멘트지지력의 90%에 해당하는 지지력을 가질 수 있으며, 회전 기초 개념도 함께 적용되어 적절한 지반변형을 야기할 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 알루미늄 기초 모형은 상부구조물의 무게를 고려하여 A/A_c 값이 10이 되도록 산정하고 이에 맞추어 [그림 129-(a)]와 같이 기초 모형을 제작하였다.

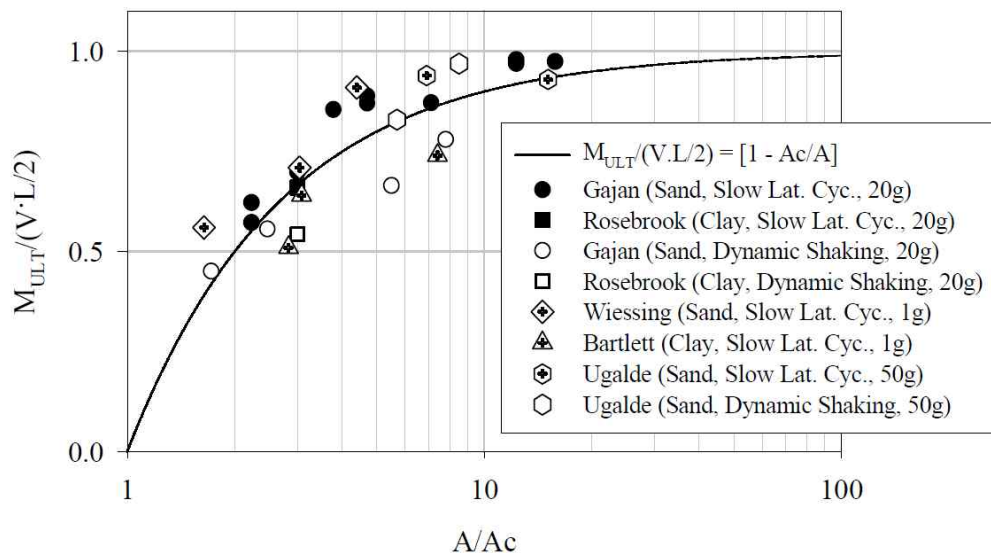
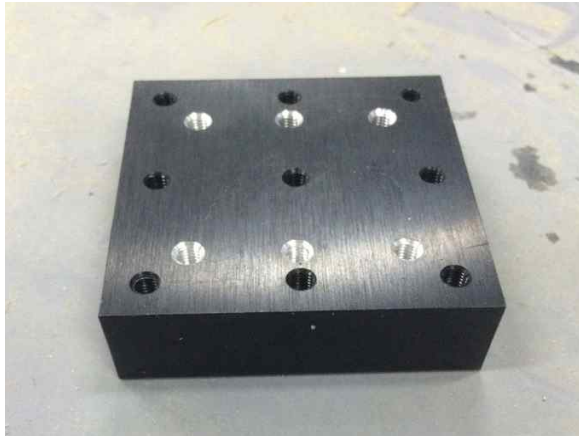
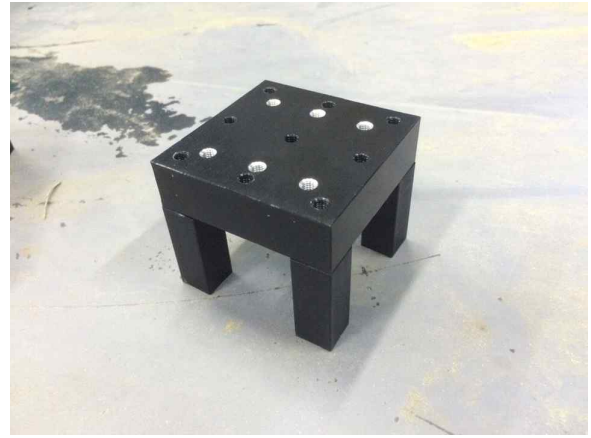


그림 128. 얇은 기초의 정규화 된 극한 모멘트 하중과 A/A_c 관계 (Gajan 등, 2008)



(a) 얇은 기초 모형



(b) 말굽형 기초 모형

그림 129. 실험에 사용된 기초 모형

Deng 등(2011)은 얇은 기초 하부 지반에 설치된 콘크리트 Pad가 지반을 개량하는 효과를 야기하며, 이에 따라 콘크리트 Pad가 설치되지 않은 얇은 기초의 임계 접촉 면적(A_c)값보다 더 작은 임계 접촉 면적(A_c)값을 갖게 함으로써 기초의 영구 침하를 감소시켰음을 보였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 말뚝 길이의 1/5에 해당하는 길이의 알루미늄 Pad 모형을 제작하였다. 제작된 알루미늄 Pad 모형을 얇은 기초의 각 꼭짓점 하부 지반에 설치하고, 얇은 기초 모형과의 결합 유무에 따라 결합된 형태는 말굽형 기초(Horseshoe Shape)([그림 129-(b)]), 분리된 형태는 비결합 말굽형 기초(Disconnected Horseshoe Shape)이라 명명하였다. 비결합 말굽형 기초는 알루미늄 Pad를 지반에 설치한 후 원형수준으로 0.2m, 모형수준으로 1cm에 해당하는 지반을 조성한 후 얇은 기초를 설치하였다([그림 130]).

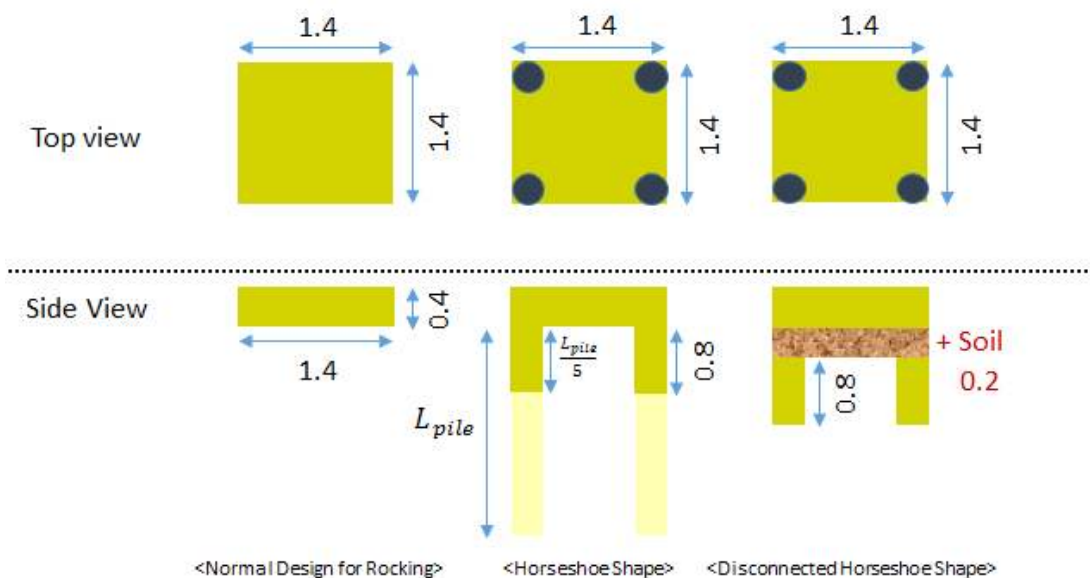
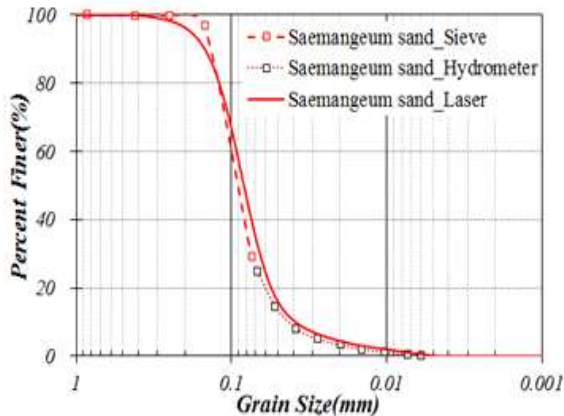


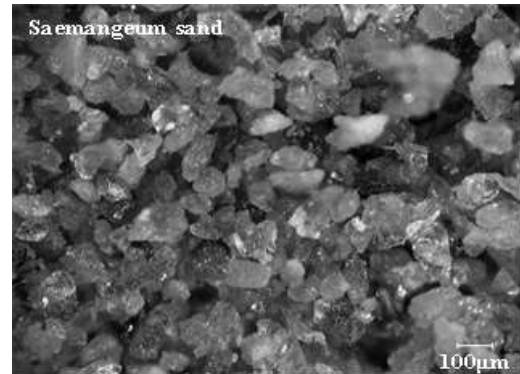
그림 130. 개선된 형태의 얇은 기초 모형 제원 (원형수준, 단위 : m)

(2) 모형 기반 시료

본 연구에서는 기초의 회전거동으로 인한 지반의 침하를 극대화하기 위해 실트질이 포함된 사질토(SM)인 새만금 흙을 건조단위중량 $1.3t/m^3$, 상대밀도 40%로 느슨하게 층 다짐으로 조성하였다. 새만금 흙의 균등계수(C_u)는 2.11이며, 평균입경(D_{50} , mm)은 0.080이며, [그림 131]과 같이 새만금 흙은 불규칙한 입자의 모습을 나타낸다. 보다 자세한 새만금 흙의 물성은 [표 17]에 나타내었다.



(a) 입도 분포 곡선



(b) 현미경 확대 사진

그림 131. 새만금 흙의 입도 분포 곡선 및 입자 사진

표 17. 새만금 시료의 기본 물성치

Fine contents (passing #200)	D_{50} (mm)	C_u	G_s	$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)	$\gamma_{d,min}$ (kN/m^3)
0.37	0.08	2.11	2.67	16.17	11.76

(3) 실험 단면 및 정보

[그림 132]는 본 연구에서 수행된 느린 수평반복하중 실험의 단면이다. 본 실험에 사용된 구조물, 센서, 수평 반복하중 단계, 지반조성 등은 모두 앞 절 얕은 기초의 회전거동 평가에 나타내었던 것과 동일하며, 구조물과 결합된 기초의 형태는 얕은 기초, 말굽형 기초, 비결합 말굽형 기초 총 3가지를 사용하였다. 본 연구를 통해 수행된 실험은 모두 원심가속도 20g 수준에서 수행되었으며, 수행된 느린 수평반복하중 실험 정보를 [표 18]과 같이 정리하였다.

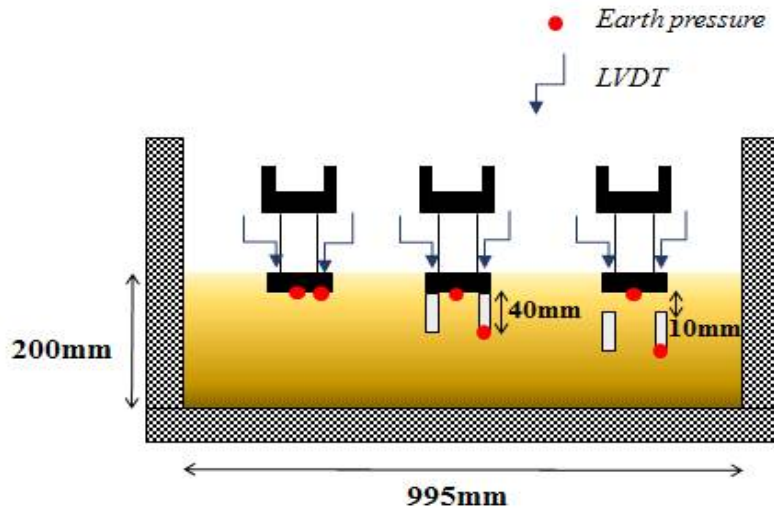


그림 132. 느린 수평반복하중 실험 단면 (모형수준)

표 18. 느린 수평반복하중 실험 정보

Test no.	Structure Type	FND Type	Slenderness Ratio	Test name
시험 1	SDOF1 (ST4) (Effective Height = 1.36m)	Shallow Foundation (SH)	0.97	ST4_SH
		Horseshoe Foundation (P4)	0.97	ST4_P4
시험 2	SDOF2 (ST8) (Effective Height = 2.1m)	Shallow Foundation (SH)	1.5	ST8_SH
		Horseshoe Foundation (P4)	1.5	ST8_P4
		Disconnected Horseshoe Foundation (P4D)	1.5	ST8_P4D
시험 3	SDOF3 (ST12) (Effective Height = 2.8m)	Shallow Foundation (SH)	2	ST12_SH
		Horseshoe Foundation (P4)	2	ST12_P4

(4) 침하-회전각 곡선과 모멘트-회전각 곡선

[그림 133, 134, 135]는 수평반복하중에 따른 모멘트-회전각 곡선과 침하-회전각 곡선을 SDOF1, SDOF2, SDOF3 모형에 대해 도시한 것이다. 모멘트-회전각 곡선에서 기초에 가해지는 모멘트는 시스템의 최대 전도 모멘트로 정규화 하였다. 최대 전도 모멘트가 발현되는 지반은 시스템의 수직안전율이 무한대에 가깝고, 이에 따라 A/A_c 값 또한 무한대에 가까워지기 때문에 [식 (13)] 과 같다.

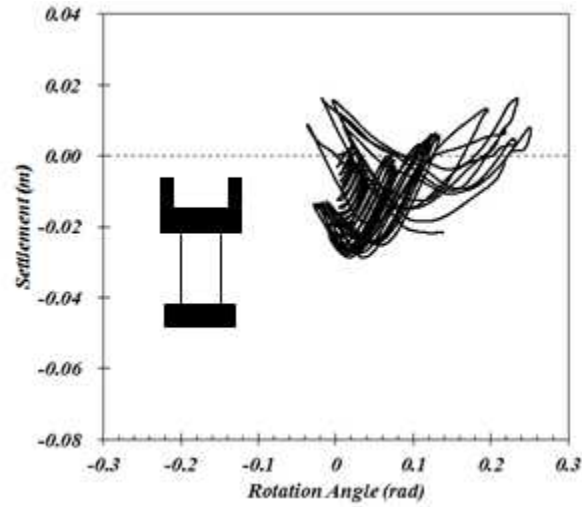
$$M_R = \frac{V \times L}{2} \left(1 - \frac{A_c}{A}\right) \approx \frac{V \times L}{2} \quad \text{식 (13)}$$

여기서 V : 상부 시스템의 무게, L : 기초의 폭, A_c : 기초의 임계 접촉 면적, A : 기초의 면적

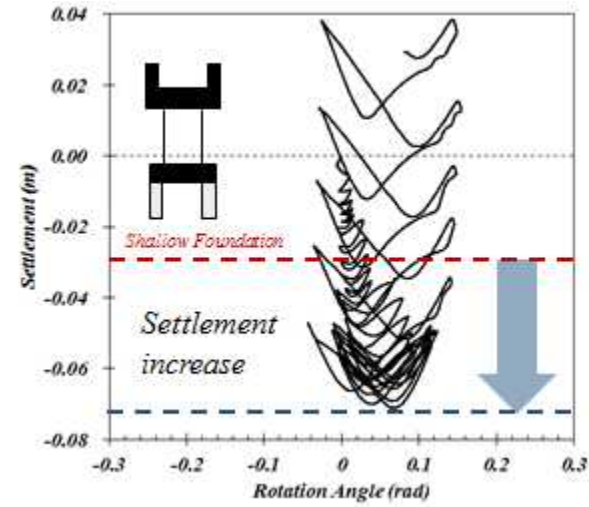
대표적으로 SDOF 2의 얇은 기초 경우인 [그림 134-(a)-1]을 보면 1단계(항복변위의 5%변위하중)와 2단계(항복변위의 10%변위하중)까진 회전각이 변함에 따라 기초가 계속해서 침하함을 알 수 있다. 이 때 [그림 134-(b)-1]의 모멘트-회전각 곡선은 탄성거동에 가까우며, 선형거동에 가까운 거동을 보인다. 반면 수평반복하중 단계가 증가함에 따라 기초 하부지반면의 곡률이 증가하고 원형현상이 진행되면서 회전각이 커질수록 기초의 융기(uptifting)현상이 발생하며, 모멘트-회전각 곡선은 비탄성거동을 보이고, 이전 수평반복하중 단계보다 더 큰 비선형성을 보인다. 또한 특정 회전각 이후로는 기초의 전도 모멘트가 기초의 극한 모멘트 지지력에 수렴함을 관찰 할 수 있다. 따라서 수평반복하중의 변위하중이 커질수록 기초의 회전거동에 의한 에너지 감쇠가 커짐을 알 수 있다.

반면 SDOF 2의 말굽형 기초 경우인 [그림 134-(a)-2] 보면 얇은 기초의 경우와 달리 수평반복하중의 3단계(항복변위의 20%변위하중)까지도 기초의 융기(uptifting)현상이 발생하지 않고 기초의 회전에 의한 침하가 계속됨을 알 수 있다. 이는 기초 하부지반에 설치된 알루미늄 Pad가 얇은 기초 보다 많은 범위의 주변 지반을 교란시켜 보다 큰 영구 침하를 발생시키는 것으로 판단된다. [그림 134-(b)-2]는 말굽형 기초의 모멘트-회전각 곡선을 나타낸 것이다. 해당 그래프에서 관찰할 수 있듯이 말굽형 기초는 얇은 기초에 비해 보다 큰 모멘트 지지력을 갖는다. 이는 기초하부에 설치된 알루미늄 Pad에 의해 기초가 수평방향의 저항력을 더 크게 갖게 되고, 해당 저항력에 의해 모멘트 지지력 또한 증가되는 것으로 판단된다. 따라서 말굽형 기초는 얇은 기초의 극한모멘트 지지력을 증가시키는 것에는 이점이 있지만 얇은 기초 보다 큰 영구 침하를 발생시킴을 알 수 있다.

[그림 134-(a)-3]는 비결합 말굽형 기초의 침하-회전각 곡선을 도시한 것이다. 비결합 말굽형 기초의 경우 초기 수평반복하중 단계인 1단계(항복변위의 5%변위하중)와 2단계(항복변위의 10%변위하중)까진 얇은 기초와 유사하게 침하-회전각, 모멘트-회전각 특성을 갖고, 침하량 또한 유사함을 관찰할 수 있다. 하지만 수평반복하중 단계가 증가함에 따라 기초의 융기(uptifting)현상이 얇은 기초 보다 더 크게 발생하며, 0.04m 수준의 영구 침하 이후로는 침하가 발생하지 않음을 알 수 있다. [그림 134-(b)-3]는 비결합 말굽형 기초의 모멘트-회전각 곡선을 도시한 것이다. 비결합 말굽형 기초 또한 얇은 기초와 동일하게 회전각이 증가함에 따라 기초의 전도 모멘트가 기초의 극한 모멘트 지지력에 수렴한다. 다만 비결합 말굽형 기초는 얇은 기초보다 지반의 소성변형을 더 적게 발생시키기 때문에 모멘트-회전각 곡선이 S자 형태에 가까운 형태를 띠을 관찰 할 수 있다. 이는 기초 하부지반에 설치된 알루미늄 Pad가 지반의 강성을 증가시키기 때문이라고 판단된다. 따라서 비결합 말굽형 기초가 지진 시 얇은 기초의 회전거동을 유발함과 동시에 기초의 회전거동으로 인한 지반의 영구 침하를 효과적으로 감소시킬 수 있을 것이다.

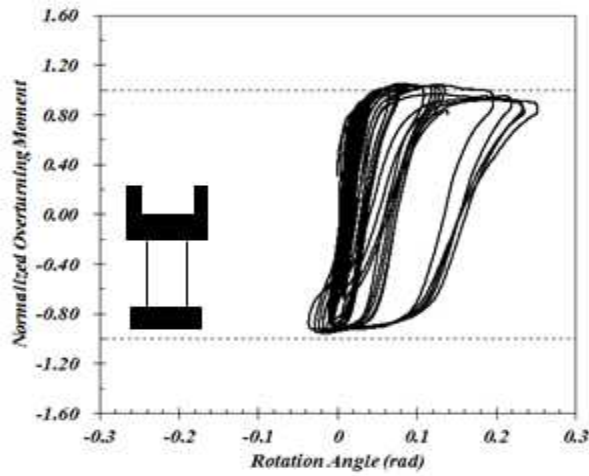


(a-1) ST4_SH

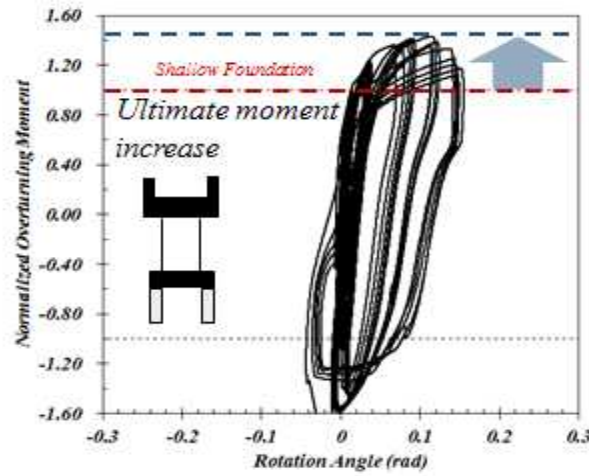


(a-2) ST4_P4

(a) 침하-회전각 곡선



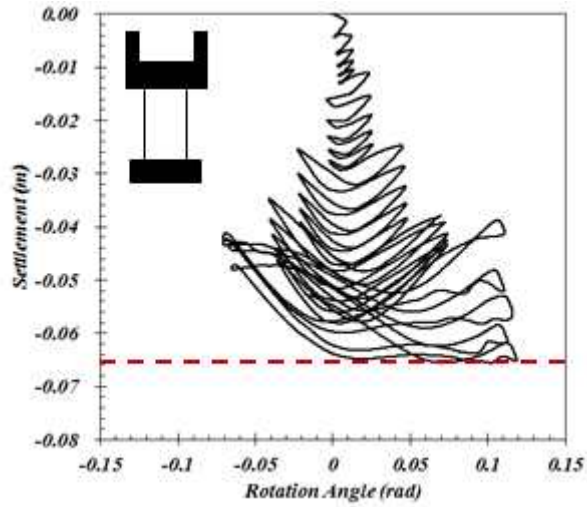
(b-1) ST4_SH



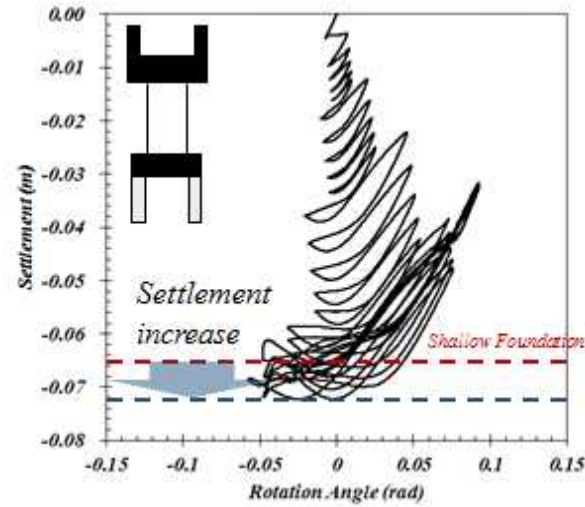
(b-2) ST4_P4

(b) 정규화된 모멘트-회전각 곡선

그림 133. 구조물 SDOF1의 침하-회전각 및 정규화된 모멘트-회전각 곡선 (시험 1)

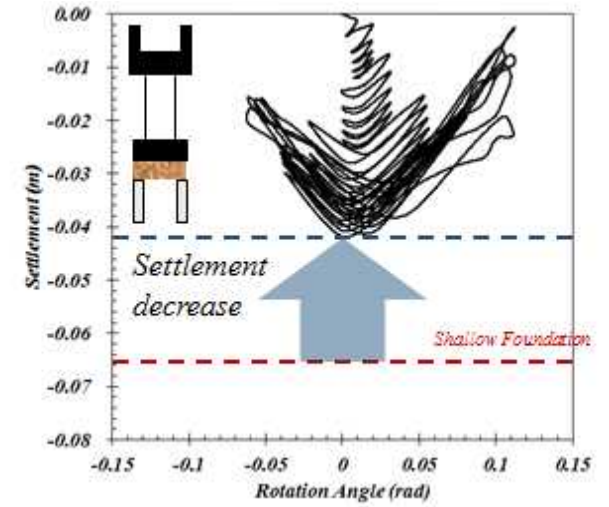


(a-1) ST8_SH

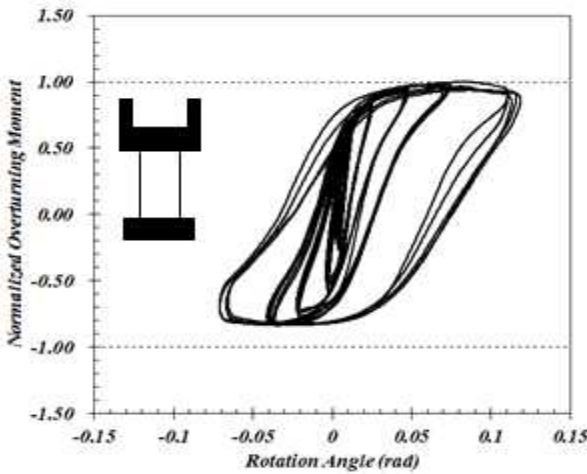


(a-2) ST8_P4

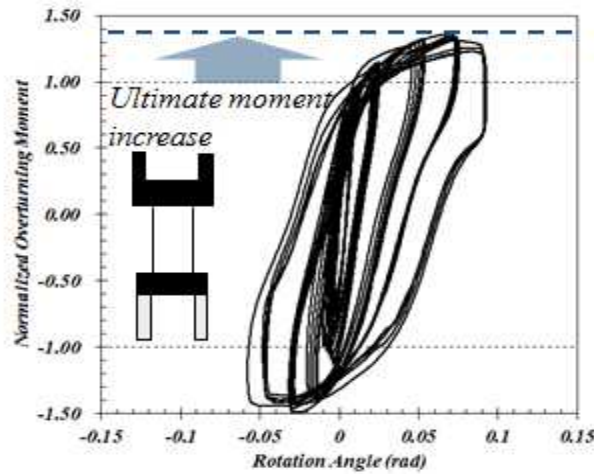
(a) 침하-회전각 곡선



(a-3) ST8_P4D

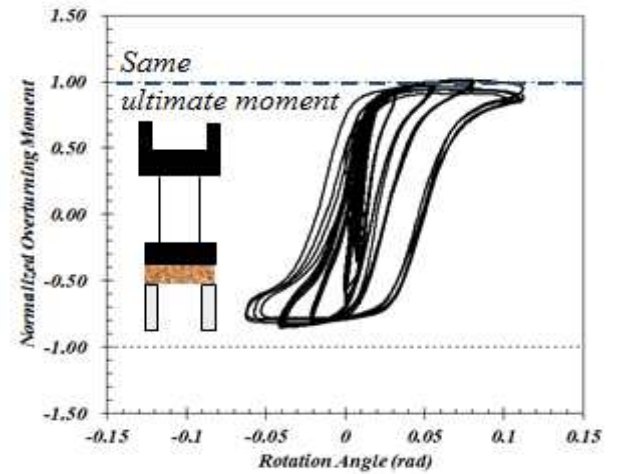


(b-1) ST8_SH



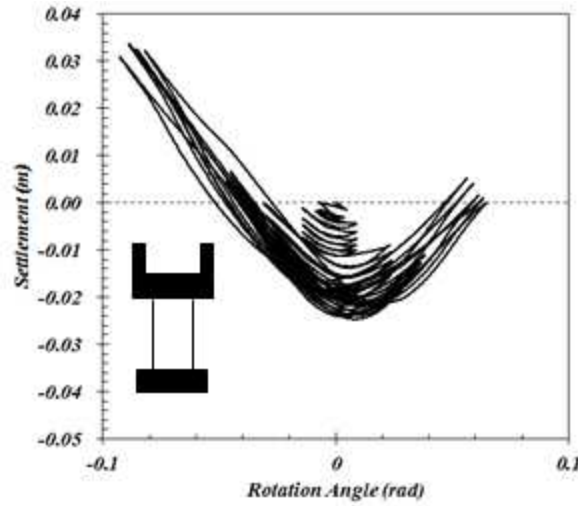
(b-2) ST8_P4

(b) 정규화된 모멘트-회전각 곡선

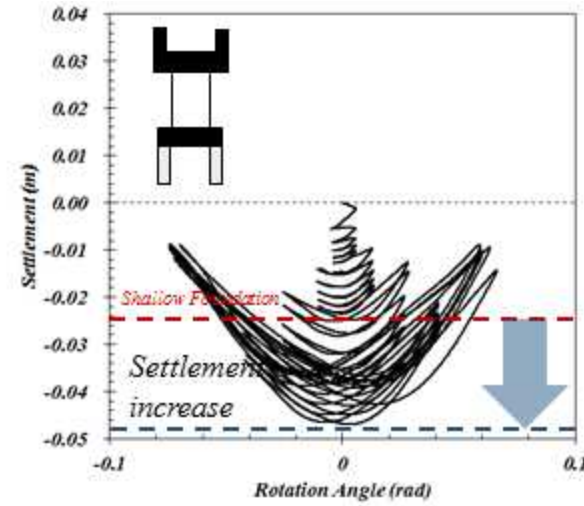


(b-3) ST8_P4D

그림 134. 구조물 SDOF2의 침하-회전각 및 정규화된 모멘트-회전각 곡선 (시험 2)

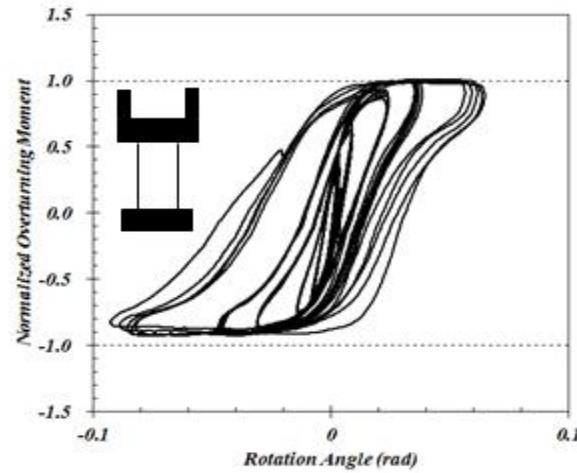


(a-1) ST12_SH

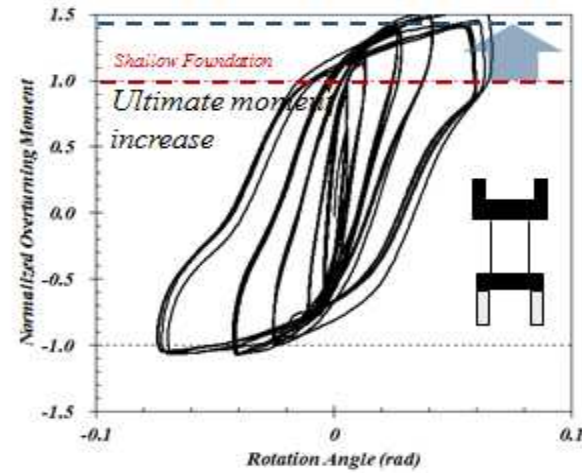


(a-2) ST12_P4

(a) 침하-회전각 곡선



(b-1) ST12_SH



(b-2) ST12_P4

(b) 정규화된 모멘트-회전각 곡선

그림 135. 구조물 SDOF3의 침하-회전각 및 정규화된 모멘트-회전각 곡선 (시험 3)

(5) 회전강성-회전각 곡선

[그림 136]은 이력곡선을 통해 기초의 회전강성(rocking stiffness)을 정의한 그림이다. 회전강성은 수평반복하중의 각 단계별 최대, 최소 모멘트와 최대, 최소 회전각을 정하고 모멘트와 회전각의 각각의 평균값을 구하여 평균 모멘트와 평균 회전각을 나뉘준 값으로 정의하였다. 본 연구에서 사용한 회전강성은 [식 (14)]와 같다.

$$K_{\theta} = \frac{\frac{M_{\max} + |M_{\min}|}{2}}{\frac{\theta_{\max} + |\theta_{\min}|}{2}} = \frac{M_{\max} + |M_{\min}|}{\theta_{\max} + |\theta_{\min}|} \quad \text{식 (14)}$$

여기서 K_{θ} : 기초의 회전강성, $M_{\max}$: 수평반복하중 단계별 모멘트 최댓값, $M_{\min}$: 수평반복하중 단계별 모멘트 최솟값, $\theta_{\max}$: 수평반복하중 단계별 회전각 최댓값, $\theta_{\min}$: 수평반복하중 단계별 회전각 최솟값

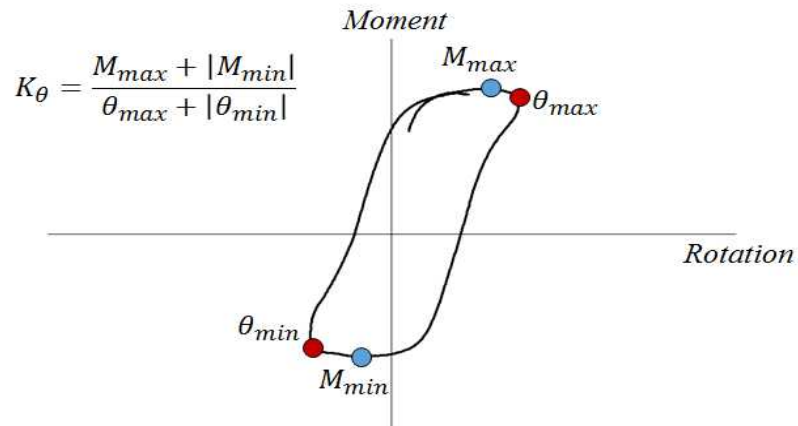
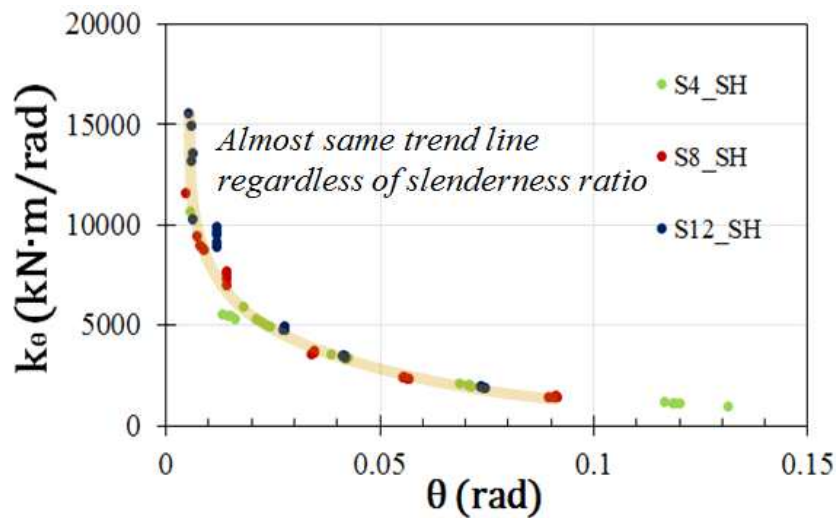


그림 136. 이력곡선을 통한 회전강성(rocking stiffness) 정의

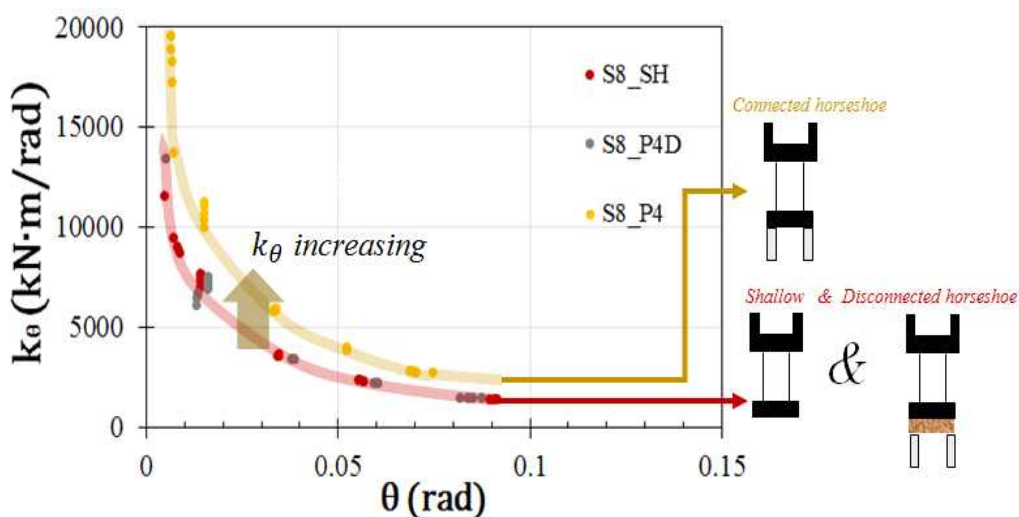
[그림 137]는 기초 회전에 따른 회전강성(rocking stiffness)변화를 기초의 회전각에 대하여 도시한 그림이다. [그림 137-(a)]는 세장비에 따른 얇은 기초의 회전강성-회전각 곡선이다. 초기 회전강성의 감소는 작은 회전각에서도 급격하게 나타나지만, 특정 회전각 이후에는 회전강성의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 이는 초기에 기초의 하부지반의 변화가 크게 발생하며, 일정한 기초의 회전 이후에는 즉, 지반의 원형현상이 진행된 이후에는 기초의 하부지반의 변화가 크게 발생하지 않기 때문이다. 또한 시스템의 세장비(구조물 높이/ 기초 폭)에 관계없이 기초의 회전강성 변화가 일정한 형태의 곡선을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 기초의 회전강성은 시스템에 작용하는 하중의 작용점에 의해 달라지는 것이 아니라, 기초 및 지반의 조건에 의해 달라지는 것을 말한다.

[그림 137-(b)]는 SDOF2 단자유도 구조물 모형에 설치된 얇은 기초, 말굽형 기초, 비

결합 말굽형 기초의 회전각에 따른 회전강성 변화이다. 세장비에 따른 회전강성 변화에서와 같이 회전강성은 초기 회전각에서 급격하게 감소하다가 특정 회전각 이후부터는 변화가 많지 않은 것을 관찰할 수 있다. 이 현상 또한 기초의 초기 회전에서는 기초 하부지반의 변화가 크기 때문이며, 지반의 원형현상이 진행된 이후에는 하부지반의 변화가 크지 않기 때문이다. 반면 기초의 회전강성의 절댓값과 경향성은 세장비에 따른 회전강성 변화와는 조금 다른 부분을 관찰할 수 있다. 얇은 기초와 비결합 말굽형 기초는 초기 회전강성의 값과 기초의 회전에 따른 변화양상이 동일하지만 말굽형 기초는 다른 두 형태의 기초보다 회전강성의 값이 크며 회전각에 따라 더 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 모멘트-회전각 곡선에서 알 수 있었듯 말굽형 기초는 기초의 모멘트를 향상시키는 효과를 가지고 있는데, 이 때문에 특정 회전각에서 발휘되는 모멘트, 즉 회전강성 또한 다른 두 기초보다 커지는 것이다. 또한 기초 하부에 설치된 알루미늄 Pad가 회전에 따른 지반 교란을 보다 많이 발생시켜 회전각에 따른 회전강성 감소가 보다 급격한 것으로 판단된다.



(a) 세장비에 따른 회전강성 변화

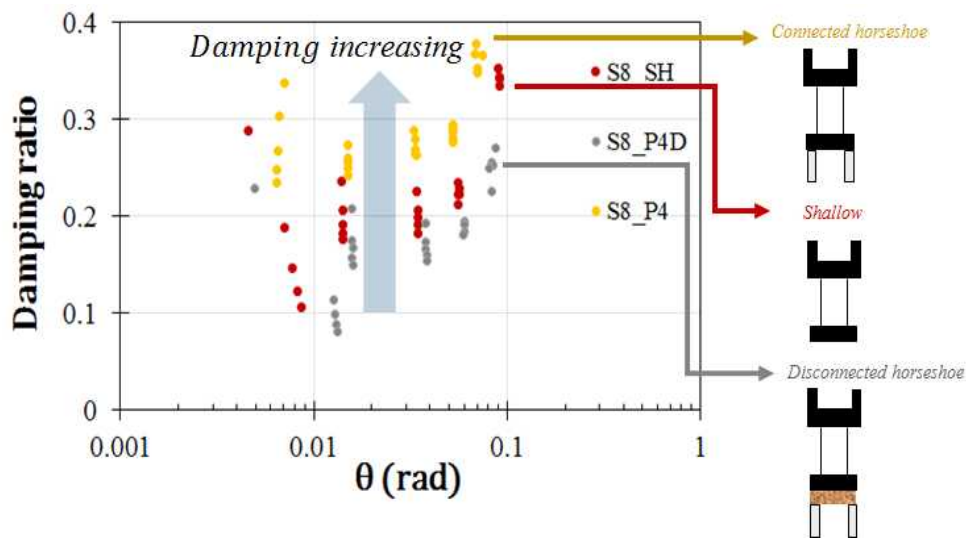


(b) 기초 형태에 따른 회전강성 변화

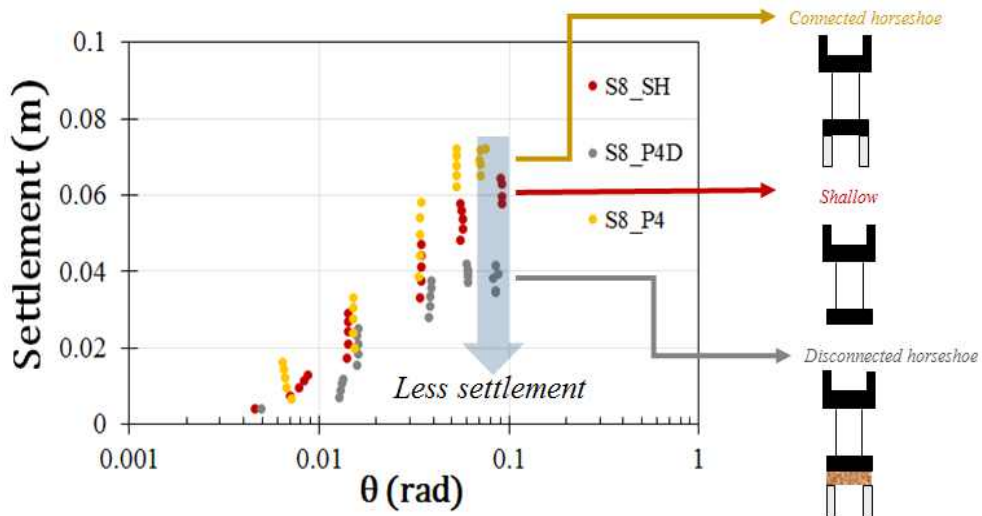
그림 137. 세장비와 기초형태에 따른 회전강성-회전각 곡선

(6) 기초 형태에 따른 감쇠비-회전각 곡선과 침하-회전각 곡선

[그림 138]은 기초형태에 따른 감쇠비-회전각과 침하-회전각 곡선을 나타낸 것이다. 해당 곡선은 대표적으로 SDOF2 단자유도 구조물 모형에 결합된 얇은 기초, 말굽형 기초, 비결합 말굽형 기초의 회전각에 대하여 감쇠비와 침하량 변화를 도시하였다. [그림 138-(a)]는 회전각에 따른 감쇠비 변화이다. 기초 형태에 관계없이 0.01rad 미만의 회전각, 즉 초기 1단계(항복변위의 5%변위하중)의 기초의 회전에 따른 감쇠비가 회전각이 0.01rad 보다 큰 경우의 기초의 감쇠비보다 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이는 기초의 초기 회전에 따른 지반의 변형이 상대적으로 크게 나타나고 이에 따라 감쇠비 또한 상대적으로 큰 값을 갖는 것으로 판단된다. 반면 0.01rad 보다 큰 회전각에서는 기초의 회전이 커질 때마다 감쇠비가 커지는 것을 확인 할 수 있다. 기초의 회전이 커지는 것은 보다 많은 영역에서 지반의 원형현상을 유발하며 이 때문에 기초의 회전각이 커짐에 따라 감쇠비가 커지는 것으로 판단된다. 한편, 기초형태에 따른 감쇠비 변화를 관찰하면, 말굽형 기초가 가장 큰 감쇠비를 보이며 그 다음 얇은 기초, 비결합 말굽형 기초 순으로 감쇠비가 작아지는 것을 알 수 있다. 기초형태에 따른 감쇠비 변화는 침하량-회전각 곡선에서 명확하게 관찰할 수 있다. 에너지 감쇠가 상대적으로 큰 말굽형 기초는 지반으로의 에너지 소산이 많아 회전각에 따른 침하량이 나머지 두 기초에 비해 큰 것을 확인할 수 있고, 이와 반대로 비결합 말굽형 기초는 회전각에 따른 지반으로의 에너지 감쇠가 적어 회전각에 따른 침하량이 나머지 두 기초에 비해 작은 것을 확인 할 수 있다. 따라서 비결합 말굽형 기초가 회전에 따른 침하에서 가장 효과적인 것으로 판단된다.



(a) 회전각에 따른 감쇠비 변화



(b) 회전각에 따른 기초 침하량 변화

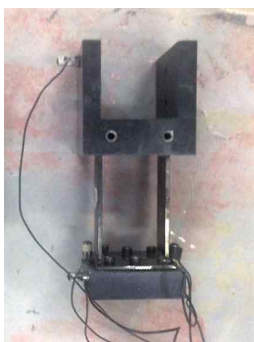
그림 138. 기초형태에 따른 감쇠비-회전각, 침하-회전각 곡선

나. 지진 실험을 통한 개선된 형태의 얇은 기초 동적거동 특성 평가

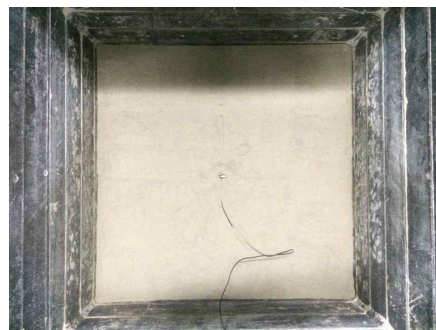
(1) 모형 제작 및 실험 과정

본 연구에서 수행된 동적 원심모형에서는 앞서 수행된 느린 수평반복하중 시험과 동일한 구조물과 기초 모델을 사용하였다([표 7], [표 18] 참고). 동적 원심모형 시험에서는 실트질이 포함된 사질토(SM)인 새만금 흙을 상대밀도 40%로 느슨하게 층 다짐으로 조성하였다. 본 실험에서 사용된 토조는 ESB(Equivalent Shear Beam) 토조로 지진 시 모형 토조의 유한한 경계 조건을 보다 현실적으로 모사하기 위해 각층마다 지반의 강성과 유사한 고무층을 설치한 토조이다(Lee 등, 2013).

토조에 조성된 지반은 총 50cm, 원형 수준으로 10m로 지반 조성 시 10cm 높이 마다 토조 중앙에 가속도계를 설치하였다. 지반 조성이 완성된 후 표면을 평평하게 하여, 가속도계 및 토압계가 부착된 구조물과 기초를 올리고 모델 조성을 마무리하였다. 이후 구조물이 설치된 토조를 원심모형시험기에 올리고 레이저 센서를 추가 설치하여 동적 원심모형 시험 준비를 완료하였다([그림 139]).



(a) 기초 및 구조물에 센서 설치



(b) 기초 지반 다짐



(c) 구조물 설치



(d) 최종 실험 모형

그림 139. 동적 원심모형시험을 위한 모형 제작과정

[그림 140]는 동적 원심모형 실험의 단면도이다. 지진에 의한 지반의 증폭현상을 관찰하기 위해 지반의 깊이별로 가속도계를 설치하였다. 기초의 회전거동으로 인한 회전각 변화를 고려하기 위해 기초의 양 끝단에 수직방향으로 가속도계를 설치하였으며, 상부 구조물에 가해지는 지진 하중을 산정하기 위해 구조물 상부 및 기초에 수평방향으로 가속도계를 설치하였다. 또한 지진에 의한 기초 및 지반 침하를 관찰하기 위해 구조물의 상부와 지반을 대상으로 수직방향의 레이저 센서를 설치하였다.

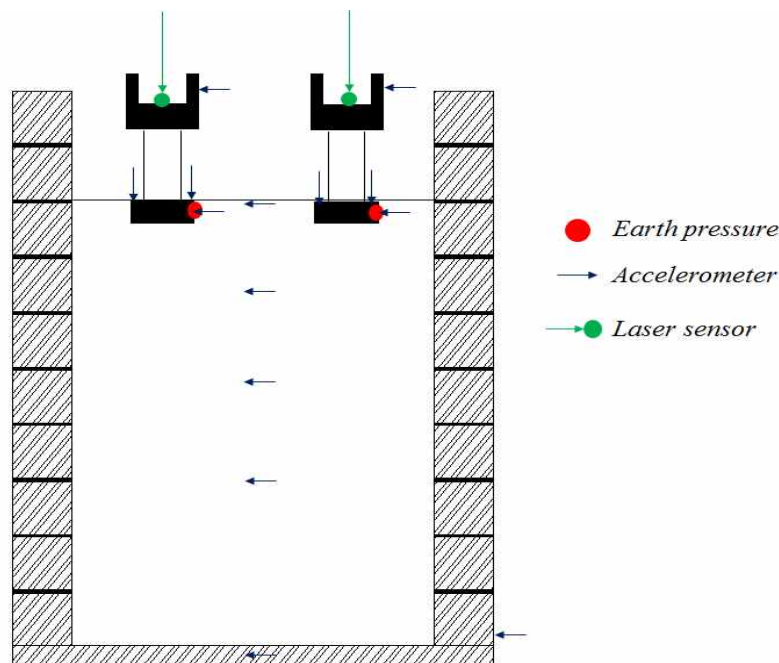


그림 140. 대표적 동적 원심모형 실험 단면

(2) 입력 지진파

지진파로는 Sweep, Ofunato, Hachinohe, 정현파 총 4가지의 지진파를 사용하였다. 지반-기초-구조물 상호작용(SFSI)효과에 의한 구조물의 정확한 주기를 파악하기 위하여 실험의 처음과 마지막에 다양한 주파수 에너지를 지닌 Sweep 신호를 입력지진파로 가했으며, 그 이후 회전 거동에 의한 시스템의 침하 특성을 보다 명확하게 관찰하기 위해 Ofunato와 Hachinohe를 기반암 기준 0.35g 이상의 강진을 차례로 가하였다. 이후 단주기 특성을 지닌 Ofunato와 장주기 특성을 지닌 Hachinohe 지진파를 약진부터 강진까지 단

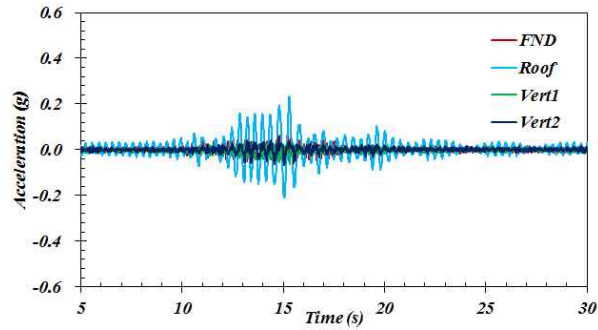
계별로 가하였다. 그 이후 구조물의 고유주기와 비슷한 주파수 대역의 정현파를 양진부터 강진까지 단계별로 가하였다.

(3) 기초 및 상부구조물 거동

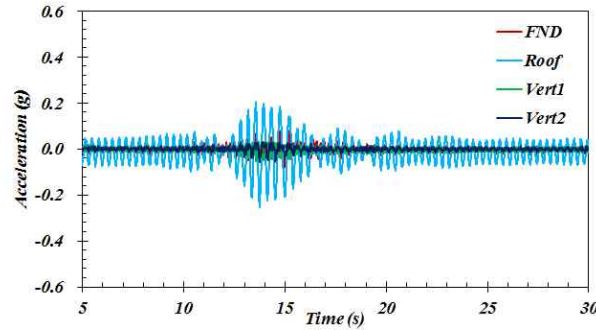
[그림 141]은 동적 원심모형시험 중 시험 2 단자유도 구조물 SDOF 2 (고유주기 = 0.465sec) 모형에 대한 가속도-시간 기록이다. FND는 기초의 수평가속도, Roof는 상부구조물의 수평가속도, Vert1은 기초의 수직가속도, Vert2는 Vert1의 반대편에 설치된 기초의 수직가속도 기록이다. 입력 지진파로는 Hachinohe 지진파의 기반암 가속도 수준 0.04g, 0.12g, 0.29g 총 3가지 기록을 대표적으로 사용하였다.

[그림 141-(a)]와 [그림 141-(b)]를 보면 기반암 가속도 수준이 상대적으로 작은 경우 상부구조물에 가해지는 지진하중이 기초에 가해지는 지진하중 보다 작은 것을 알 수 있다. 반면 [그림 141-(c)]와 같이 기반암 가속도 수준이 0.29g로 상대적으로 큰 경우 기초에 가해지는 지진하중이 구조물에 가해지는 지진하중보다 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 강진 시 기초의 회전 거동에 의해 구조물의 가속도가 상대적으로 작아지기 때문이며, 해당 효과를 얇은 기초의 “Rocking Effect”라고 한다.

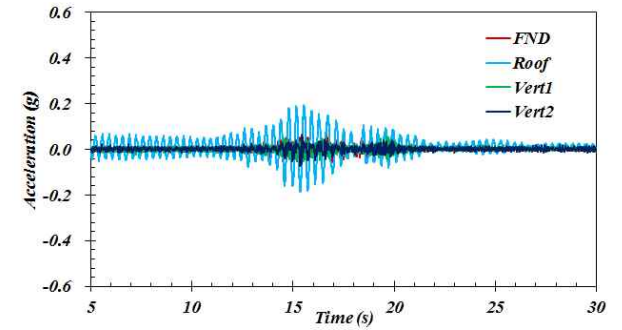
[그림 141-(c)]에서 기초의 형태에 따른 기초의 지진하중 대비 상부구조물의 상대적인 지진하중을 보면, 지진하중이 크게 발현되는 주요 구간에서 얇은 기초와 비결합 말굽형 기초는 상부 구조물에 비해 기초의 지진하중이 크게 발현되는 것을 관찰할 수 있지만, 말굽형 기초는 상부 구조물과 기초의 지진하중이 비슷하게 발현되는 것을 볼 수 있다. 이는 말굽형 기초에 설치된 알루미늄 Pad가 강진 시 기초의 회전거동을 억제하기 때문에 얇은 기초의 “Rocking Effect”를 감소시키는 것이라고 판단된다. 따라서 강진 시 기초의 회전 거동에 의해 구조물에 가해지는 지진하중을 감소시키는 “Rocking Effect”는 말굽형 기초 보다 얇은 기초와 비결합 말굽형 기초가 효과적이라고 판단된다.



(a-1) ST8_SH

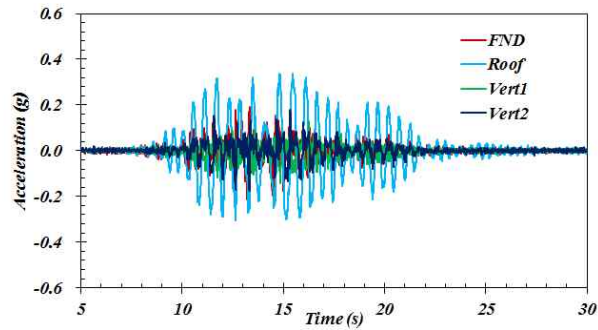


(a-2) ST8_P4

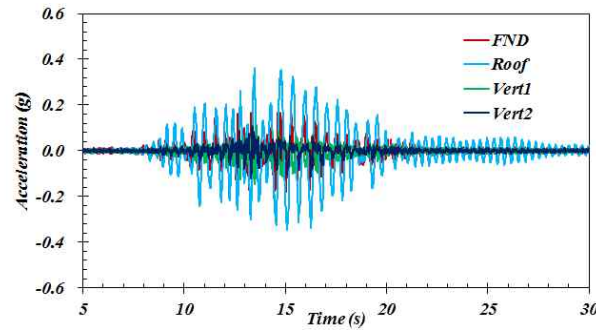


(a-3) ST8_P4D

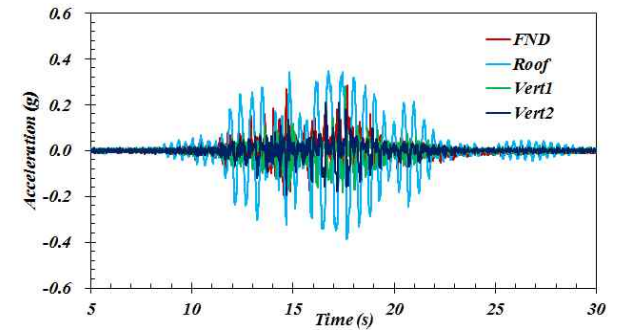
(a) 기반암 가속도 : 약 0.04g



(b-1) D-F7-S02

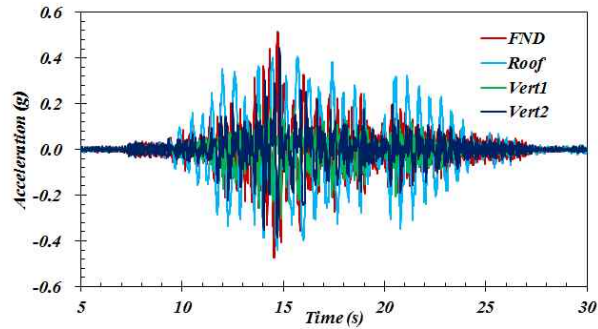


(b-2) ST8_P4

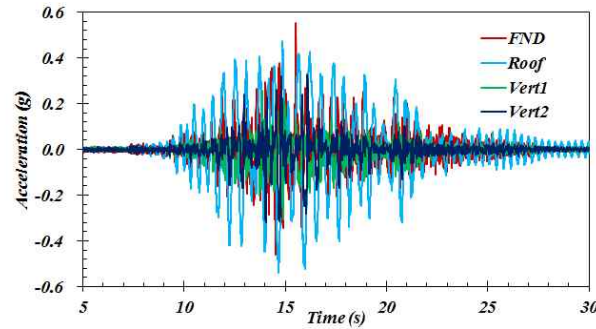


(b-3) ST8_P4D

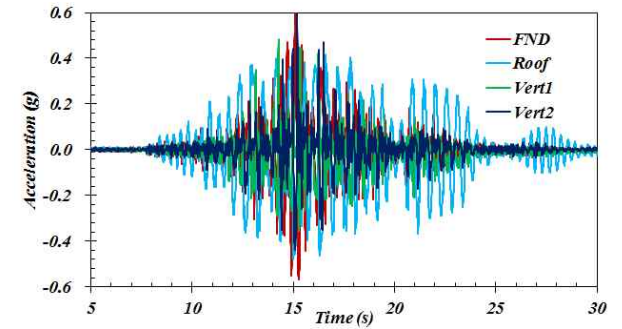
(b) 기반암 가속도 : 약 0.12g



(c-1) ST8_SH



(c-2) ST8_P4



(c-3) ST8_P4D

(c) 기반암 가속도 : 약 0.29g

그림 141. 기초 및 구조물의 계측 가속도 시간이력 (시험 2, Hachinohe EQ.)

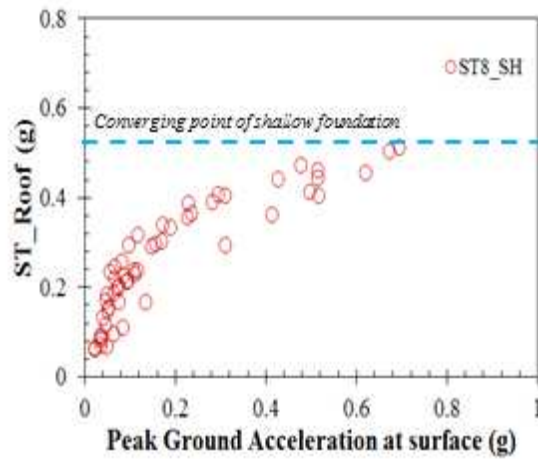
(4) 지진 시 기초 및 상부구조물 최대 지진가속도

[그림 142]는 지표면 자유장 최대 지진가속도 대비 구조물, 기초의 최대 지진가속도를 SDOF2 단자유도 구조물 모형에 대해 도시한 그림이다. [그림 142-(a)]를 보면 기초의 종류에 관계없이 포물선 형태를 띠는 것을 알 수 있다. 이는 지표면 자유장의 최대 지진가속도가 대략 0.2g보다 작은 경우 상부 구조물에 가해지는 최대 지진가속도가 자유장의 최대 지진가속도보다 크게 발현 되지만 자유장의 최대 지진가속도가 0.2g보다 크게 발현 되는 경우 상부 구조물에 가해지는 최대 지진가속도가 자유장의 최대 지진가속도보다 작게 가해지는 것을 의미한다. 이는 약한 지진에 대해서는 전체 시스템 모형의 회전이 작게 발현되기 때문에 구조물 및 기초의 회전거동에 의한 “Rocking Effect”가 없지만 강한 지진에서는 전체 시스템 모형의 회전이 크게 발현되면서 구조물에 가해지는 최대 지진가속도가 “Rocking Effect”에 의해 감소되는 것으로 판단된다.

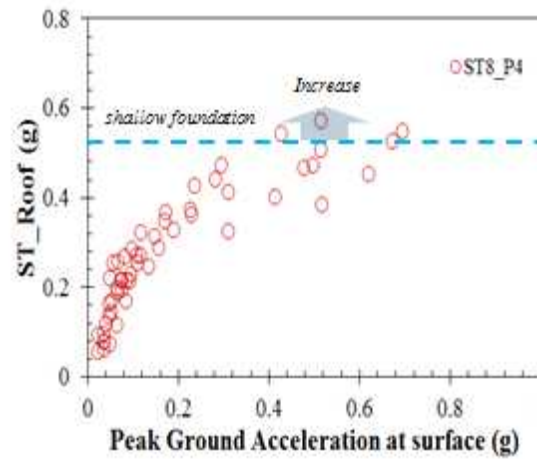
[그림 142-(a)]에서 기초의 형태에 따른 구조물에 가해지는 최대 지진가속도를 보면 말굽형 기초가 가장 크게 발현되고 얇은 기초와 비결합 말굽형 기초가 유사하게 발현되는 것을 알 수 있다. 이 역시 말굽형 기초는 강한 지진 시 기초 하부에 설치된 알루미늄 Pad에 의해 기초의 회전이 억제되기 때문에 “Rocking Effect”가 줄어드는 것으로 판단된다.

[그림 142-(b)]는 지표면 자유장 최대 지진가속도 대비 기초의 최대 지진가속도를 나타낸 그림이다. 기초의 종류에 관계없이 대부분 1:1직선을 따라가는 것을 확인 할 수 있다. 이는 지표면의 자유장 운동이 기초의 움직임을 구속하여 기초와 지표면 자유장의 움직임이 같이 유사하게 발현되기 때문이라고 판단된다.

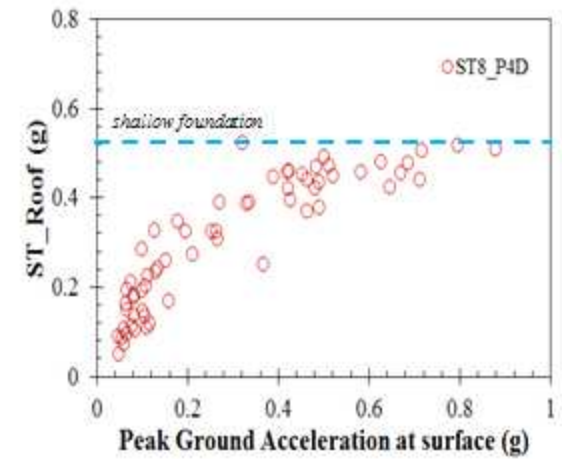
이러한 각 가속도계가 설치된 위치 별 최대 지진가속도의 계측 결과들은 강한 지진 시 기초의 최대 지진가속도에 비해 구조물의 최대 지진가속도가 현저하게 감소하는 것을 보여주며, 기초의 회전거동에 의한 “Rocking Effect”를 단적으로 보여주고 있다.



(a-1) ST8_SH

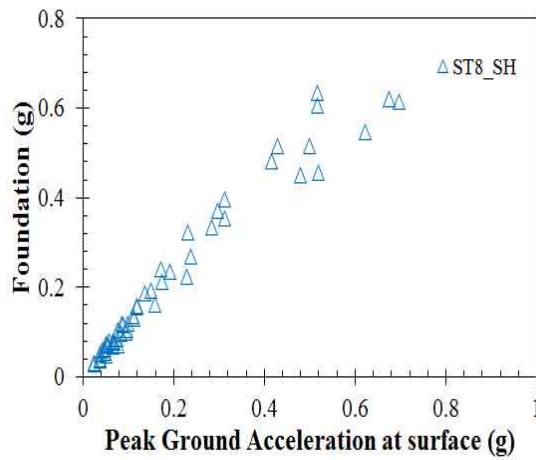


(a-2) ST8_P4

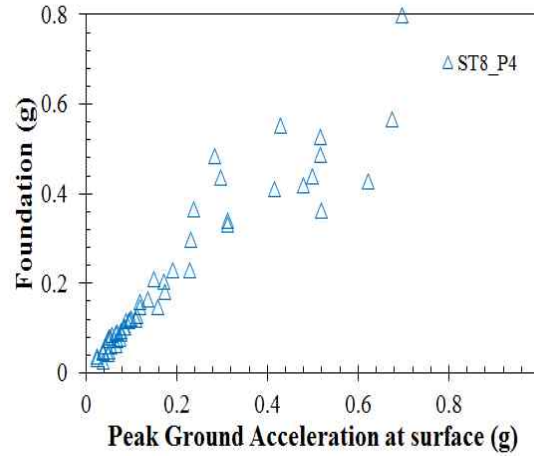


(a-3) ST8_P4D

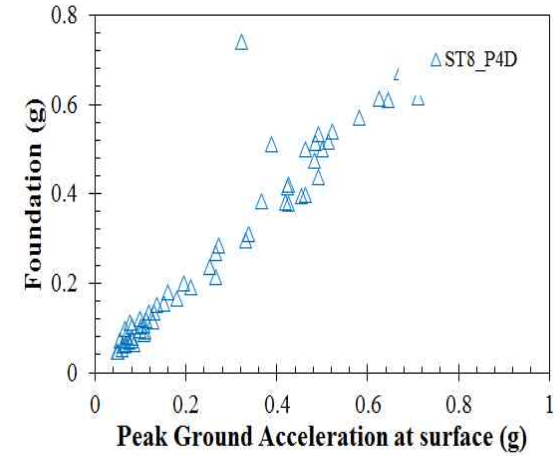
(a) 상부구조물 최대 지진가속도-지표면 자유장 최대 지진가속도



(b-1) ST8_SH



(b-2) ST8_P4



(b-3) ST8_P4D

(b) 기초 최대 지진가속도-지표면 자유장 최대 지진가속도

그림 142. 지표면 자유장 최대 지진가속도 대비 구조물, 기초의 최대 지진가속도 (시험 2)

(5) 모멘트-회전각 곡선

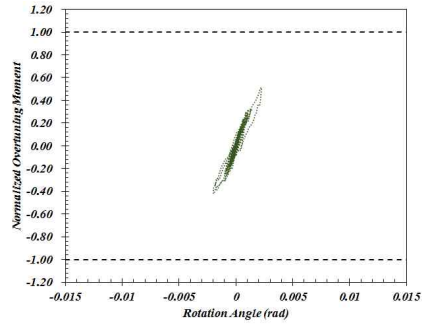
[그림 143]는 정규화 된 기초의 모멘트-회전각 곡선을 지표면 가속도에 대하여 기초 형태별로 도시한 그림이다. 기초의 최대 극한 모멘트지지력은 시스템의 연직 하중(V)과 기초의 폭(L)을 통해 계산되는 모멘트 $M=VL/2$ 로서 지진 시 얇은 기초의 전도 모멘트는 해당 최대 극한 모멘트 지지력을 넘을 수 없다. 따라서 얇은 기초의 전도 모멘트를 최대 극한 모멘트지지력으로 정규화 하였으며, 최대 극한 모멘트 지지력을 검정색 점선으로 도시하였다. [그림 143]는 SDOF2 단자유도 구조물 모형에 단주기 특성인 Ofunato 지진파가 가해졌을 때의 결과를 지표면 최대 지진가속도별로 도시한 것이다.

[그림 143-(a)]는 Ofunato 입력 지진파에 대해 지표면 가속도 약 0.07g에 해당하는 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 기초형태에 관계없이 모멘트-회전각 곡선은 탄성거동, 선형거동에 가까운 거동을 보인다. 또한 약한 지진에 해당하기 때문에 기초의 전도 모멘트가 얇은 기초의 최대 극한 모멘트 지지력보다 작게 발현되는 것을 관찰할 수 있다.

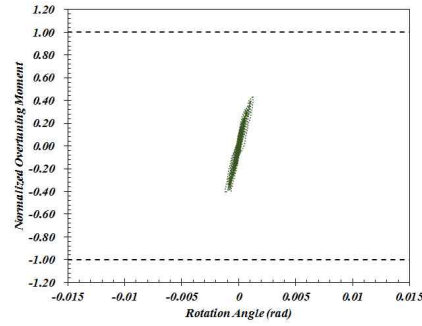
[그림 143-(b)]는 Ofunato 입력 지진파에 대해 지표면 가속도 약 0.19g에 해당하는 그림이다. 모멘트-회전각 곡선은 [그림 143-(a)]에 해당하는 형태보다 상대적으로 비탄성에 가까운 거동을 보이며, 회전각 및 모멘트 또한 크게 발현되는 것을 알 수 있다. 또한 얇은 기초와 비결합 말굽형 기초는 말굽형 기초에 비해 상대적으로 비탄성거동에 가까운 거동을 보이며 모멘트-회전각 이력곡선이 상대적으로 누운 형태를 띄게 된다. 이는 말굽형 기초가 기초의 회전을 상대적으로 억제하여 회전각이 작게 발현되기 때문으로 판단된다.

[그림 143-(c)]는 Ofunato 입력 지진파에 대해 지표면 가속도 약 0.49g에 해당하는 그림이다. 모멘트-회전각 이력곡선은 이전 경우보다 상대적으로 넓은 형태를 그리며 비탄성, 비선형 거동을 명확하게 보인다. 또한 기초의 회전이 커질수록 전도모멘트가 얇은 기초의 극한 모멘트지지력에 수렴하는 것을 보여준다. 이에 따라 지반으로 소산되는 에너지가 증가하며 이는 지반의 침하를 야기할 것으로 판단된다. 반면 말굽형 기초의 이력곡선은 얇은 기초와 비결합 말굽형 기초보다 상대적으로 더 세워진 형태를 보이며 이 역시 말굽형 기초의 회전거동이 상대적으로 억제되기 때문으로 판단된다. 또한 말굽형 기초의 이력곡선은 상대적으로 넓은 면적을 갖게 되며 지반으로의 에너지 소산에 의한 기초 침하가 많이 발생할 것으로 판단된다.

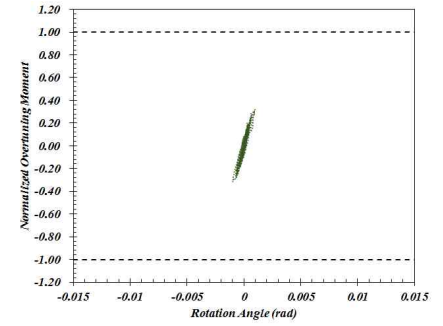
본 모멘트-회전각 곡선을 통하여 지표면 자유장 가속도가 증가할수록 기초가 비탄성, 비선형 거동을 보임을 관찰할 수 있었고, 지표면 가속도가 증가하면 기초의 전도모멘트는 극한 모멘트지지력에 수렴함을 확인할 수 있었다. 또한 말굽형 기초는 얇은 기초와 비결합 말굽형 기초에 비해 상대적으로 강체거동에 가까운 거동을 보이는 것을 관찰할 수 있었다.



(a-1) ST8_SH

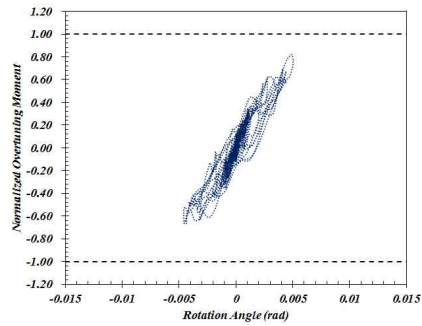


(a-2) ST8_P4

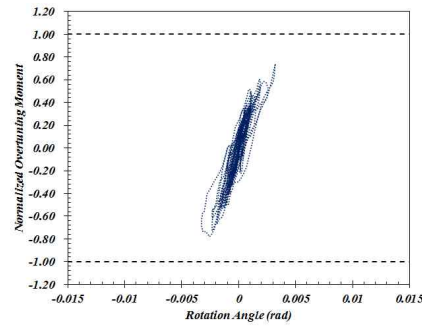


(a-3) ST8_P4D

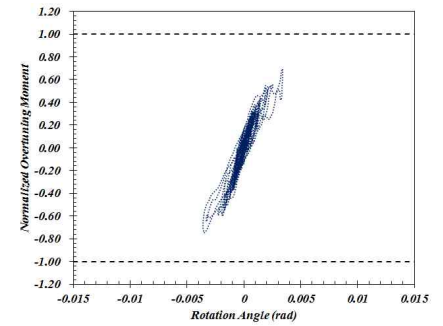
(a) 지표면 가속도 : 약 0.07g



(b-1) ST8_SH

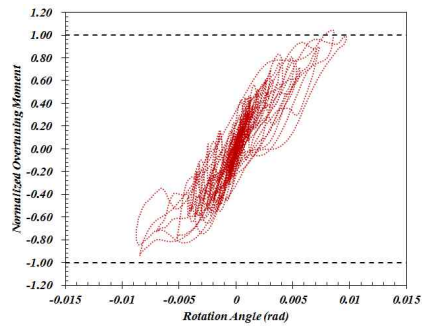


(b-2) ST8_P4

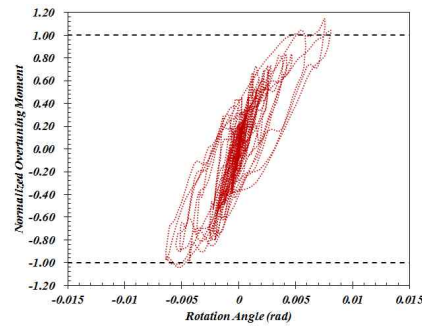


(b-3) ST8_P4D

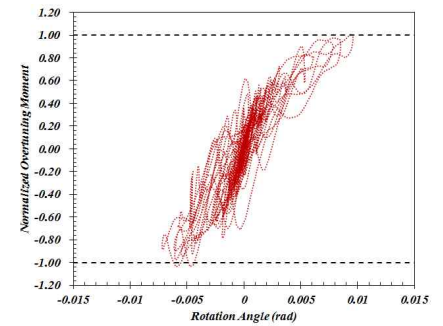
(b) 지표면 가속도 : 약 0.19g



(c-1) ST8_SH



(c-2) ST8_P4



(c-3) ST8_P4D

(c) 지표면 가속도 : 약 0.49g

그림 143. 기초 형태에 따른 정규화 된 모멘트-회전각 곡선 (시험 2, Ofunato EQ.)

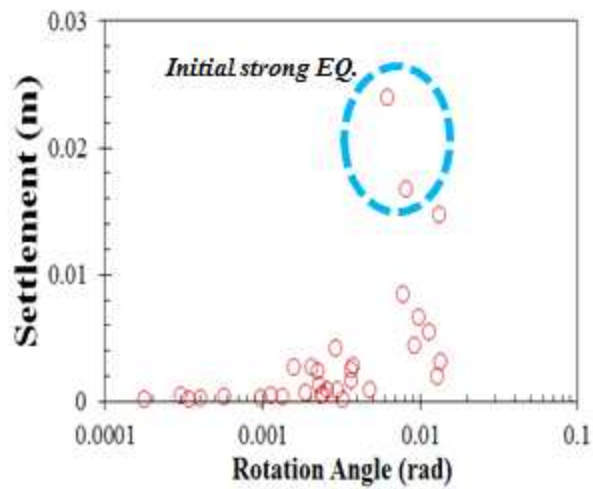
(6) 지진 시 기초형태 별 침하량 비교

구조물 및 기초 전체 시스템에 지진이 가해지면 시스템은 회전하게 되고 이에 따라 모멘트-회전각 이력곡선을 그리게 된다. 이때 전체 시스템의 회전은 방향에 의존하지 않고 완전하게 대칭을 이룰 수 없다. 따라서 [그림 144-(a)]에서 나타난 기초의 회전각은 양방향 회전각의 최댓값의 평균으로 구하였다.

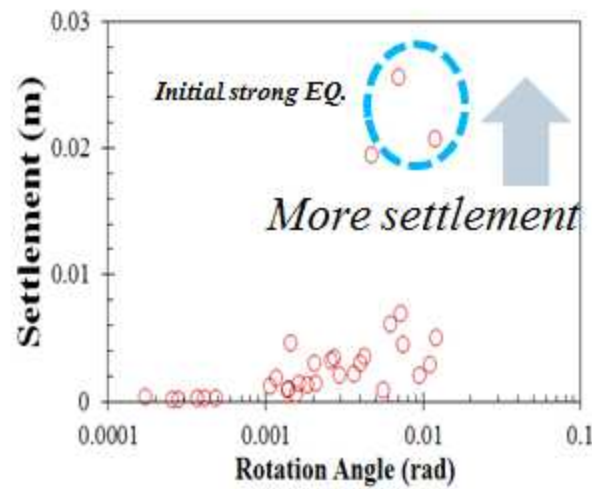
[그림 144-(a)]에서 기초의 회전각이 커질수록 기초의 침하량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 결국 회전각이 커짐에 따라 기초 하부지반의 원형현상이 증가하고 이 때문에 지반침하량이 증가하는 것으로 판단된다. 기초 형태에 따른 침하량에서는 비결합 말굽형 기초, 얇은 기초, 말굽형 기초 순으로 침하량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 느린 수평반복하중 결과와 일치하며, 말굽형 기초는 기초 회전에 의한 수평지반의 교란으로 인해 상대적으로 침하량이 증가하며, 비결합 말굽형 기초는 하부지반에 설치된 알루미늄 Pad가 지반을 개량하는 효과 때문에 상대적으로 침하량이 감소하는 것으로 판단된다.

[그림 144-(b)]에서 역시 최대 지표면 자유장 가속도가 증가할수록 기초의 침하량이 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 한편, 얇은 기초와 비결합 말굽형 기초는 최대 지표면 자유장 가속도 약 0.2g 이후에 기초의 침하가 증가하는데 반해 말굽형 기초는 최대 지표면 자유장 가속도 약 0.4g 이후에 기초의 침하량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 말굽형 기초가 다른 기초에 비해 상대적으로 강체거동을 보이기 때문에 더 강한 지진까지 기초의 항복거동이 발현되지 않는 것으로 판단된다.

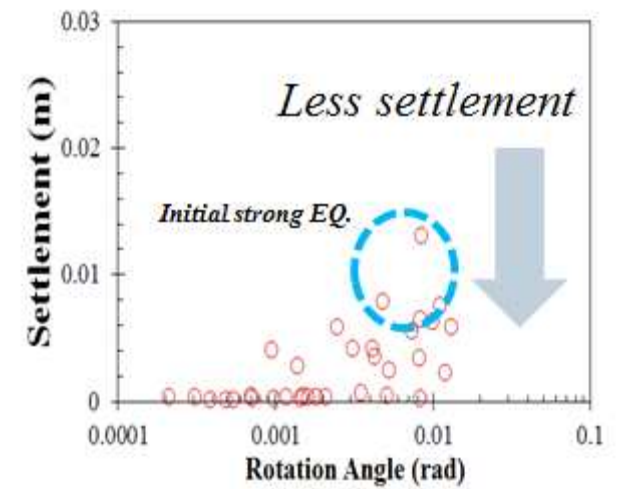
따라서 지진 시 기초의 회전거동으로 인한 기초의 침하량은 비결합 말굽형 기초가 가장 적은 것으로 관찰되며, 비결합 말굽형 기초는 얇은 기초와 유사한 최대 지표면 자유장 가속도에서 기초의 항복거동이 발현되는 것으로 판단된다.



(a-1) ST8_SH

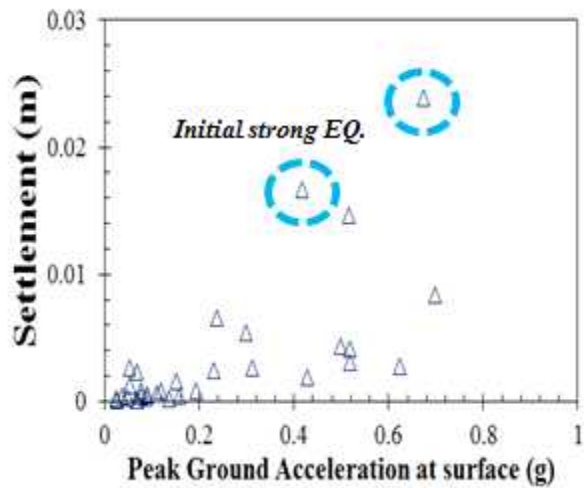


(a-2) ST8_P4

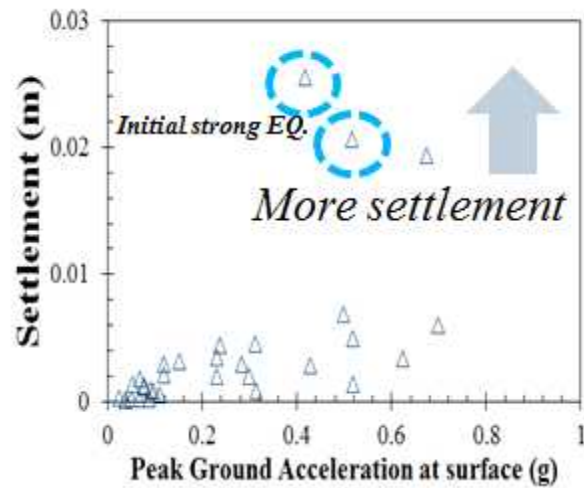


(a-3) ST8_P4D

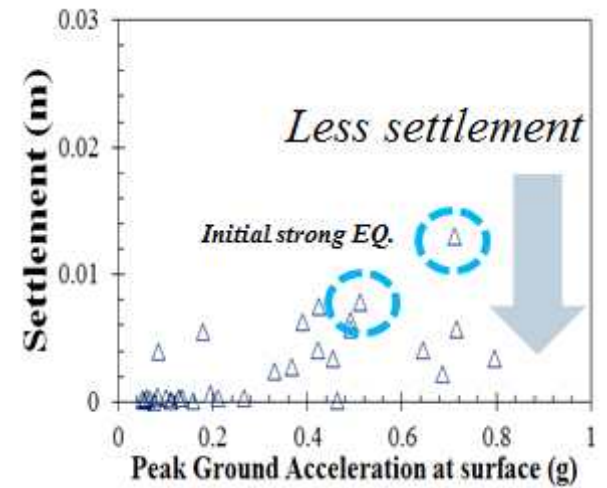
(a) 최대 회전각 대비 기초 침하량



(b-1) ST8_SH



(b-2) ST8_P4



(b-3) ST8_P4D

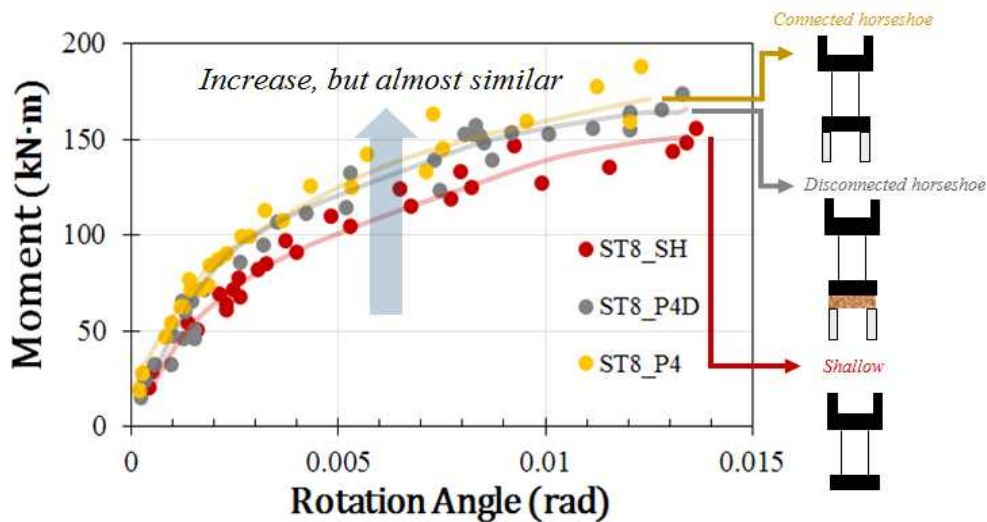
(b) 최대 지표면 자유장 가속도 대비 기초 침하량

그림 144. 구조물 SDOF2의 최대 회전각 및 최대 지표면 자유장 가속도 대비 기초 침하량 (시험 2)

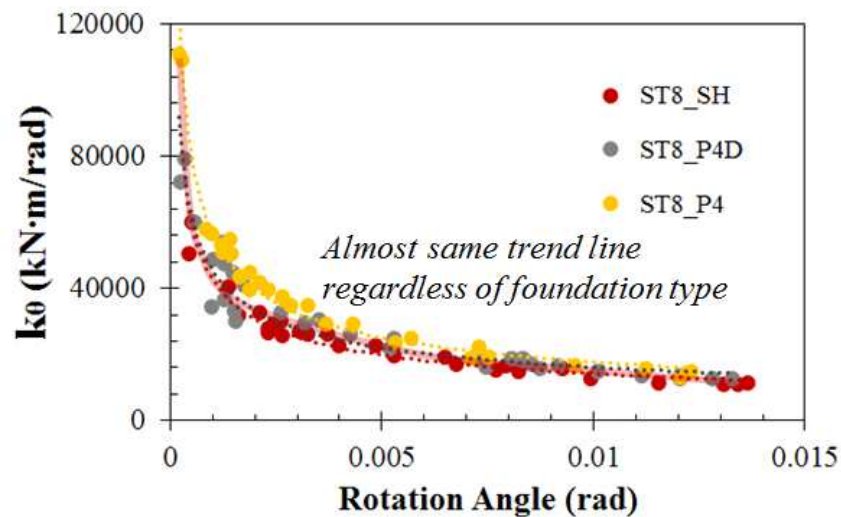
(7) 기초형태에 따른 모멘트-회전각 backbone 곡선과 회전강성-회전각 곡선

[그림 145-(a)]는 기초형태에 따른 모멘트-회전각의 backbone 곡선을 도시한 것이다. 모멘트-회전각의 backbone 곡선은 각각의 입력 지진파에 대하여 시스템이 나타낸 최대의 모멘트와 최대의 회전각을 하나의 점으로 나타내어 모든 입력 지진파에 대하여 하나의 그래프로 도시하였다. 기초형태에 관계없이 회전각이 커질수록 모멘트가 증가하다가 특정 회전각 이후부터 일정한 값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 기초의 전도모멘트가 기초가 가지는 극한모멘트 지지력을 넘지 못하기 때문이다. 한편 동일한 회전각에서 갖는 모멘트는 말굽형 기초, 비결합 말굽형 기초, 얇은 기초 순으로 작은 값을 갖게 되는데 수평반복하중 실험결과와 달리 거의 유사한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 수평반복하중 실험 시에는 말굽형 기초가 하부지반에 설치된 알루미늄 Pad에 의해 수평지반을 저항하며 모멘트 지지력을 증가시키는 현상을 발현하였다. 반면, 지진 실험 시에는 입력 지진파가 짧은 시간 동안 가해지며 기초뿐만 아니라 기초의 하부지반까지도 입력 지진파에 의해 같이 거동하기 때문에 말굽형 기초가 수평반복하중 실험결과만큼 모멘트 지지력 증가율을 보이지 못하는 것으로 판단된다.

[그림 145-(b)]에 도시한 회전강성에 따른 회전강성은 말굽형 기초가 얇은 기초와 비결합 말굽형 기초보다 큰 값을 발현하며 수평반복하중 실험과 같은 경향을 보인다. 하지만 회전강성 값이 수평반복하중 실험에 비해 크게 나타나며 기초형태 별 회전강성-회전각 곡선이 명확한 차이를 보이지 않는다. 이는 수평반복하중 실험 시 기초에 발현시키는 회전각이 지진 시 기초에 발현되는 실제 기초의 회전각 보다 크며, 이 차이에 의해 지진 실험의 회전강성 결과 값이 수평반복하중 실험 결과보다 더 큰 값을 갖는 것으로 판단된다.



(a) 모멘트-회전각 backbone 곡선



(b) 기초 형태에 따른 회전강성 변화

그림 145. 기초형태에 따른 모멘트-회전각 backbone 곡선과 회전강성-회전각 곡선

다. 소결

“항복거동을 이용하는 신개념 기초 설계 형태 제안 및 검증” 연구를 수행한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 지진 시 얇은 기초의 항복거동을 유발하여 구조물의 지진하중을 저감시키고 항복거동으로 인한 기초 하부지반의 영구적 변형도 감소시킬 수 있는 Pad와 얇은 기초가 결합된 말굽형 기초와 Pad와 결합되지 않은 비결합 말굽형 기초 개발
- 말굽형 기초는 얇은 기초의 회전거동에 중요한 극한 모멘트 지지력을 증가시키나 기초의 회전거동으로 인한 기초의 침하량을 증가시킴.
- 비결합 말굽형 기초는 얇은 기초와 유사한 동적거동을 나타내며 강진 시 구조물의 지진하중을 감소시킴과 동시에 기초의 회전거동으로 인한 침하량을 감소시킴.
- 얇은 기초의 하부지반에 알루미늄 Pad를 설치함으로써 얇은 기초의 회전거동으로 인한 지진하중 감소효과를 발현함과 동시에 기초의 회전거동으로 인한 침하를 감소시킬 수 있음을 수평반복하중 실험과 동적 원심모형 실험을 통해 검증.
- 본 연구를 통해 지진 시 항복거동을 이용한 얇은 기초 설계 시 개선된 형태의 얇은 기초인 비결합 말굽형 기초를 제안하고 검증함으로써 건설현장의 적용성 증대

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

1절 최종 연구 성과

○ 원심모형실험을 이용한 기초 항복거동 및 에너지소산 메커니즘 규명

- 기초의 회전이 진행됨에 따라 지반면이 둥글게 변화하는 원형현상(soil surface rounding)이 나타나며, 이로 인해 임계상태에서 기초의 최대모멘트가 극한 모멘트 지지력과 같아지는 현상을 확인. 기초의 회전각이 작을 때는 기초는 탄성거동에 가까운 거동을 보이며, 회전각이 커질수록 시스템의 비선형성과 에너지 감쇠가 커짐을 확인. 동적 원심모형실험을 통해서 기초의 회전각과 상부구조물의 전도 모멘트 관계로부터 큰 지진 하중이 가해졌을 때, 지반-기초 면의 항복거동으로 시스템의 큰 에너지 소산 확인.

기초 하부지반 원형현상에 의한 항복거동 및 에너지 소산 메커니즘 규명

그림 146. 원심모형실험을 이용한 기초 항복거동 및 에너지소산 메커니즘 규명

○ 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 시 거동 특성 및 적용성 평가

- 지진 시 기초 시스템의 수직 침하하는 비결합 말뚝기초에서 얕은기초보다 작게 발생하며, 회전거동에 의한 상부 구조물 지진하중의 제한 효과는 동일하게 나타나므로 비결합 말뚝기초 형태가 항복거동을 이용하는 경제적이고 안전한 설계임을 확인함.

기초 항복 거동 (작은 지진하중)

비결합 말뚝 기초를 이용한 안전하고 경제적인 기초 설계

말뚝기초를 활용한 침하 저감

그림 147. 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 시 거동 특성 및 적용성 평가

- 풍화토 지반에서의 기초 하부지반 항복 거동 특성 및 적용성 평가
 - 풍화토 지반의 경우 상대적으로 적은 침하량이 발생하였으며, 기초 회전에 의한 지진하중 저감 효과는 동일하게 나타나므로 국내에 가장 널리 분포하고 있는 풍화토 지반에서 기초 항복 거동을 이용한 경제적인 기초 설계 가능성을 확인함

기초 항복 거동

**풍화토 지반에서 말뚝기초
활용으로 비경제적설계**

**풍화토 지반 위 얽은기초
활용으로 경제적 설계**

그림 148. 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 시 거동 특성 및 적용성 평가

- 항복거동을 이용하는 신개념 기초 설계법 개발 및 검증
 - 항복거동을 이용한 신개념 기초 설계법 개발 및 검증 (분리된 말굽형 기초)
 - 얽은 기초의 하부지반에 알루미늄 Pad를 설치함으로써 얽은 기초의 회전거동으로 인한 지진하중 감소효과를 발현함과 동시에 기초의 회전거동으로 인한 침하를 감소시킬 수 있음을 확인.

분리 말굽형 기초

다양한 기초 형태에 대한 실험적 평가

**항복거동을 이용한
신개념 기초 설계법 검증**

그림 149. 항복거동을 이용하는 신개념 기초 설계법 개발 및 검증

항복 거동을 이용한 신개념 내진 설계 기법 개발

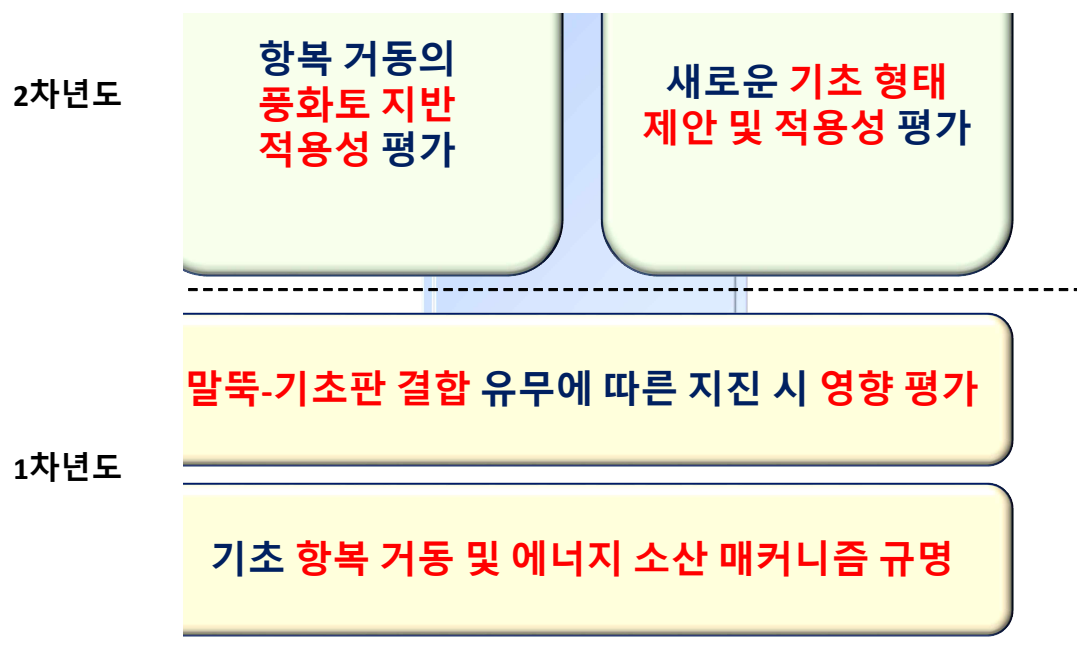


그림 150. 연구개발 과정 및 최종 성과

2절 주요 연구성과(학술적 성과 및 기술적 성과)

가. 학술적성과 - SCI 급

	구분	성과명	상태	발생(예상)시점
1	주관 (KAIST)	“Rocking response of SDOF structures on various-size shallow foundations via centrifuge test”, <i>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</i>	<i>Under Review</i>	2016
2	주관 (KAIST)	“Development of Seismic CPT for Evaluating In-Flight Soil Properties in Centrifuge Model Test”, <i>KSCE Journal of Civil Engineering</i>	<i>Under Review</i>	2016
3	주관 (KAIST)	“Evaluation of soil state variation using bender elements within centrifuge models” <i>Geotechnical Testing Journal</i>	<i>Under Review</i>	2016
4	주관 (KAIST)	“Comparison of seismic rocking behavior for various disconnected pile foundation systems” <i>Bulletin of Earthquake Engineering</i>	예정	2017

나. 학술적성과 - 비SCI 급

	구분	성과명	상태	발생(예상)시점
1	주관(KAIST)	“다양한 기초 형식에 따른 단자유도 구조물 지진하중 평가를 위한 동적 원심모형실험”, 한국지진공학회, 9월호	Published	2016
2	주관(KAIST)	“수평반복하중 실험을 이용한 근입된 얇은 기초의 회전거동 메커니즘 평가”, 한국지반공학회, 8월호	Accepted	2016
3	주관(KAIST)	“동적 원심모형실험을 이용한 풍화토 지반에 놓인 얇은기초 시스템의 지진 시 회전 거동 특성 평가”, 한국지반공학회	<i>Under Review</i>	2016

다. 학술적성과 - 국내외 Conference

	구분	성과명	발생(예상)시점
1	주관(KAIST)	“기초형태에 따른 지반-기초-구조물 상호작용 평가를 위한 동적원심모형실험” 2015년 한국지진공학회 봄학술발표회 논문집, 가천대학교, 2015.3.27	2015
2	주관(KAIST)	“원심모형실험에서의 지반 물성 계측을 위한 SCPT 시스템 개발” 2015년 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 한국과학기술회관(서울), 2015.3.20.	2015
3	주관(KAIST)	“동적 원심모형실험을 활용한 비결합 말뚝 기초의 지진 시 거동 특성 평가” 2015년 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, 군산새만금컨벤션센터(군산), 2015.10.28.-30	2015
4	주관(KAIST)	“Evaluation of seismic loads on structures considering soil-foundation-structure interaction via centrifuge” 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Fukuoka, Japan, 2015.11.09.-13	2015
5	주관(KAIST)	“Evaluation of cap embedment effect to the seismic load of pile foundation using the dynamic centrifuge test” The 28 th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, Bangkok, Thailand, 2015.11.16.-18	2015
6	주관(KAIST)	“원심모형실험을 이용한 얇은 기초의 회전 및 수평 거동 특성 평가” 2016년 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 한국과학기술회관(서울), 2013.3.17.-18	2016
7	주관(KAIST)	“Evaluation of soil-foundation-structure interaction for the various foundation types via centrifuge test” 4th International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, North Cyprus, 2016.06.02.-04	2016
8	주관(KAIST)	“수평반복하중 실험을 통한 기초형식에 따른 회전거동특성 평가” 2016년 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, 제주국제컨벤션센터(제주), 2016.10.20.-21	2016

3절 기술 실시 및 적용사례

1. 항복거동을 이용한 구조물의 기초 (특허 출원)

- ◎ 발명의 명칭: 항복거동을 이용한 구조물의 기초
- ◎ 출원 일자: 2016년 05월 31일
- ◎ 출원 번호: 10-2016-0067507
- ◎ 출원인 명칭: 한국과학기술원
- ◎ 발명자 성명: 김동수, 고길완, 하정곤, 박헌준
- ◎ 요약: 본 발명은 항복거동을 이용한 구조물의 기초에 관한 것이다. 토목 구조물 시공 시 상부 구조물의 하중을 받치도록 지반 내에 얹은 기초를 설치하게 된다. 이때 얹은 기초의 크기를 작게 시공함으로써 지진 시 시스템의 항복거동으로 인한 구조물의 안정성을 확보할 수 있다. 하지만 시스템의 항복거동으로 인한 기초 하부지반의 영구변형은 해당 설계법의 취약점으로 작용한다. 따라서 본 발명은 얹은 기초에 패드형 말뚝을 결합시킴으로써 기초와 구조물의 항복거동 시 발생할 수 있는 지반변형을 최소화하는데 목적이 있다.
- ◎ 참고사항: 본 발명은 발명자의 아이디어에 의존한 특허 출원이다. 아이디어 출원 이후 지속된 연구 및 실험 결과를 미루어보아 기초와 결합하지 않은 패드형 말뚝을 지반에 설치한 것에 대한 연구가 필요한 것으로 판단되며 이를 바탕으로 추후에 본 발명 또한 보완해야하는 것으로 판단된다.

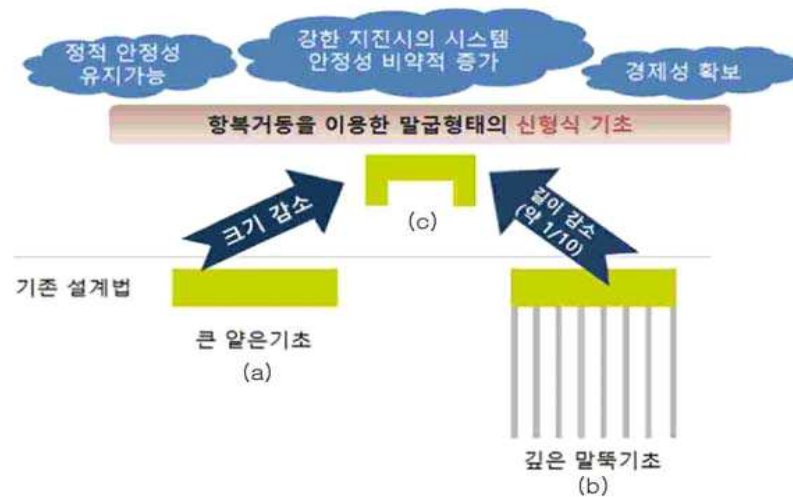


그림 151. 항복거동을 이용한 구조물 기초의 장점

2. 지반 축소모형 제작기 및 제작방법 (특허 출원)

- ◎ 발명의 명칭: 지반 축소모형 제작기 및 제작방법
- ◎ 출원 일자: 2016년 01월 29일
- ◎ 출원 번호: 10-2016-0011877
- ◎ 출원인 명칭: 한국과학기술원
- ◎ 발명자 성명: 김동수, 박헌준, 박희수, 하정곤, 고길완

◎ 요약: 본 발명은 지반 축소모형 제작기 및 제작방법에 관한 것으로서, 흙에 의해 지반 축소모형이 조성되는 토조 위에 설치되는 다짐기 본체틀; 상기 다짐기 본체틀에 설치되어 상기 다짐기 본체틀을 따라 이동하는 이동지지대; 상기 이동지지대에 설치되어 이동지지대의 길이방향을 따라 이동하는 다짐기 본체; 상기 다짐기 본체에 설치되어 흙을 낙하시키는 낙사기; 상기 다짐기 본체에 설치되어 상기 토조 내로 승하강하는 다짐수단; 및 상기 다짐기 본체에 설치된 3D 스캐너를 포함한 것이며, 기존의 수작업이 많이 필요한 지반 축소모형 제작을 아주 수월하게 자동으로 제작하게 됨으로써, 같은 시간에 다양한 연구를 수행하여 양질의 성과를 낼 수 있고 인건비도 절감할 수 있는 효과가 있다.

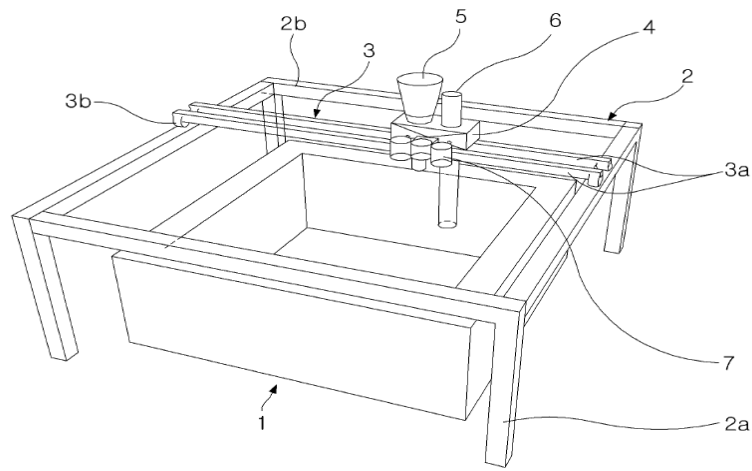


그림 152. 원심모형실험을 위한 지반 축소모형 제작기 개념도

4절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

- 항복거동을 이용한 기초 내진 설계 법은 높은 수준의 전문 지식과 경험을 필요로 하며, 이로 인해 국내외에서 지반지진공학 전문과와 내진 설계 전문가에 대한 고용 창출 효과 기대
- 강도 설계에서 성능 기반 내진 설계로 설계 패러다임이 전환되고 있는 시점에서, 다양한 기초 형태에 대한 항복거동 및 지진하중 특성을 평가하여 보다 빠르고 정확한 대응 및 세계적 리딩 그룹으로 도약 가능
- 기초-지반-구조물이 복잡하게 상호작용하는 거동에 대한 원심모형실험 결과 D/B를 구축함으로써, 향후 수치모델링 검증 및 설계기준 개선을 위한 자료로 활용 가능
- 풍화토 지반에서의 얕은기초 활용, 비결합 말뚝기초의 활용의 적용성에 대한 원심모형실험 결과를 바탕으로 국내·외 내진 설계에서 경제적 설계 가능

제4장 연구목표 달성 및 효과

1절 연구개발 최종목표 달성도

본 연구에서는 동적 원심모형실험을 활용하여 항복 거동을 이용하는 기초-지반-구조물 시스템의 에너지 소산 메커니즘 및 허용 침하량을 평가하고, 이를 바탕으로 현행 설계 기준의 문제점을 보완할 수 있도록 항복 거동을 이용하는 신개념 내진설계 기법을 개발하는 것을 최종 목표로 한다. 이를 달성하기 위해 다음과 같은 세부 목표를 설정하였다.

(가) 기초 하부지반 항복 거동 및 에너지 소산 메커니즘 규명

- 기초 하부지반 소성 거동을 이용하여 상부 구조물의 작용하중을 감소시키는 설계 개념 분석
- 동적 원심모형 실험을 이용한 기초 하부지반 항복 에너지 및 지진 하중 감소 효과 검증

(나) 말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 시 영향 평가

- 기초 형태 (말뚝 기초, 얇은 기초 등)에 따른 소성 거동 실험적 검증
- 정적 및 동적 변위량 평가 및 안정성 평가

(다) 기초 하부지반 항복 거동 및 에너지 소산 메커니즘 규명

- 국내 풍화토 지반에서의 지진 시 기초 하부지반 항복 거동 실험적 분석
- 지진 하중 감소 효과 분석 및 경제성 평가

(라) 기초 하부지반 항복 거동 및 에너지 소산 메커니즘 규명

- 항복 거동을 유발하면서 기초판의 지지력을 향상시킨 복합 기초 형태 제안
- 동적 원심 모형실험을 이용한 지진 시 거동 평가 및 적용성 검증

위와 관련한 연구목표 달성도는 다음과 같다.

연구목표 달성도

번호	세부연구목표	달성내용	달성도(%)
1	양적 지표 : 비 SCI급(3건)	비SCI 3건 (1건 under review)	100%
2	양적 지표 : SCI급(1건)	SCI 3건 (3건 under review)	80%
3	양적 지표 : 특허출원 1건	특허 출원 2건	100%
4	양적 지표 : 학술회의 발표건수 (3건)	학술회의 발표 8건	100%
5	양적 지표 : 원심모형실험 8건	원심모형실험 10건	100%
6	양적 지표 : 학술 수상 실적	학술대회 논문상 2건	100%
7	양적 지표 : 인력양성 배출실적	동적원심모형실험 전문가(석사학위 2명 + 박사학위 1명) 배출	100%
8	기초 하부지반 항복 거동 및 에너지 소산 메커니즘 규명	원심모형실험 결과를 바탕으로 기초 하부지반 원형현상에 의한 항복 거동 및 에너지 소산 메커니즘 규명	100%
9	말뚝-기초판 결합 유무에 따른 지진 시 영향 평가	비결합 말뚝기초에 대한 원심모형실험을 수행하여 지진 하중 및 침하량 평가	100%
10	풍화토 지반에서의 기초 하부지반 항복 거동 적용성 평가	풍화토 지반에서 얇은기초와 비결합 말뚝기초의 항복거동 및 침하량 평가 수행	100%
11	항복거동을 이용하는 신개념 기초 형태 제안 및 검증	분리된 말굽형 기초에 대한 정적, 동적 원심모형실험을 수행하여 적용성 평가 수행	100%

※ 보고서 작성 시점(2016년 8월) 이후에 게재되는 국내논문 및 국외 SCI 논문은 게재 후 결과를 진흥원 연구관리 시스템에 입력할 예정임.

2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

- 얇은 기초 항복거동의 메커니즘을 이해함으로써 기초 내진 설계법의 패러다임 전환 및 새로운 내진 설계 기술의 현장 적용성 증대
- 얇은 기초의 항복을 이용한 설계개념을 말뚝 기초의 개념과 결합된 신개념 내진 설계 기법인 비결합 말뚝 기초형태를 제시함으로써 얇은 기초가 시공될 수 없는 현장에서 도 항복을 이용한 설계개념을 적용할 수 있는 방향 제시
- 동적 원심모형실험을 통한 지반-기초-구조물 상호작용 모형실험 기법을 검증함으로써 지반지진공학 전반에 걸친 신기술 개발에 필요한 실험대형 실험, Test bed 구축과 같은 고가의 실험 방법 대체할 수 있는 모형 실험 기술 역량 확보
- 원심모형실험을 통한 내진 설계 기술연구를 바탕으로 설계 지진하중 산정에 대한 물리적 모델링 전문 지식을 보유한 신진 고급 인력 배출
- 국내·외 건설업체의 수요에 대응함으로써 동적 원심모형시험 기술의 발전 및 내진 설계 기술 발전을 도모
- 우리나라 건설현장에서 쉽게 접할 수 있는 풍화토 지반에서의 얇은 기초의 항복 거동을 검증함으로써 우리나라에서 항복거동을 이용한 얇은 기초의 적용성을 향상.
- 비결합 말뚝기초의 지진하중 저감 효과 및 침하량 억제 효과는 향후 국외 강진 지역에 대한 기초 내진 설계 시 적극적으로 이용 가능할 것으로 판단됨.
- 동적 원심모형실험과 원심모형시험을 통한 정적 반복하중 실험의 관계를 평가함으로써 얇은 기초 내진 설계 연구에 발전 및 기술 제공
- 일반적인 말뚝의 1/5에 해당하는 말뚝형태의 Pad를 하부지반의 설치함으로써 얇은 기초의 항복 거동을 이용한 설계 시 취약점인 하부지반의 변형을 감소시키는 설계 기술 확보.



그림 153. 연구개발 성과의 기술적 효과

3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등)

- 기존 국외 실험기관에 의뢰할 수밖에 없었던 동적 원심모형시험 기술 수요의 국산화를 통한 대체 효과
- 설계 기술의 발전으로 새롭고 정확한 설계기술력을 요하는 국제적 건설 수요에 대한 국내 건설업체의 시장점유율 증가
- 향후 아시아, 중동, 아프리카 등 신흥시장에 대한 국내 건설업체의 시장 점유율 확대에 본 연구 과제를 통해서 선진화된 내진 성능 평가 기술 활용
- 강도 설계에서 성능 기반 내진 설계로 설계 패러다임이 전환되고 있는 시점에서, 지반 토목 구조물 시스템에 대한 지진 하중을 다각도로 평가하여 보다 빠르고 정확한 대응 및 세계적 리더 그룹으로 도약 가능
- 선진화된 기초 내진 설계법은 높은 수준의 전문 지식과 경험을 필요로 하며, 이로 인해 국내외에서 지반지진공학 전문과와 내진 설계 전문가에 대한 고용 창출 효과 기대
- 초장대 및 초고층 구조물과 같이 대형 토목 구조물의 경제적이고 안전한 얽은기초 설계기술 확보 및 해외 건설시장 경쟁력 확보
- 고가의 실험대형 모형실험을 대체함으로써 대형 토목구조물의 설계검증 비용 절감, 기존 국외 실험기관에 의뢰하던 기술수요의 국산화를 통한 대체 효과
- 경제적이고 안전한 내진 설계 기술을 제시함으로써 건설사들의 효과적이고 효율적인 내진설계 시공가능성 증대

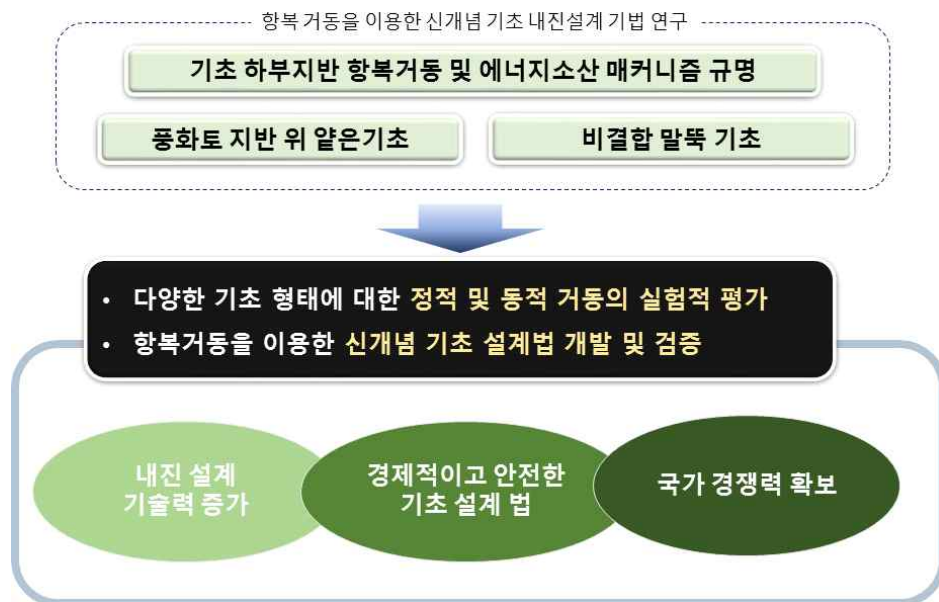


그림 154. 연구 개발 성과의 경제적 효과분석

4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

- 국가적 차원의 내진설계 기술 체계 정비와 국가 사회의 지속적 성장 기반 확립 실현
- 현재까지 국제적 수준에서 미진했던 지반공학의 원심모형시험 관련 연구 활성화 및 우수 전문가 양성
- 우리 생활에 밀접한 지반 구조물 시스템에 대한 내진 성능 평가와 설계 기준 개선을 통해서 내진 안정성을 확보. 이를 바탕으로 국민들의 자연재해(지진)에 대한 안전 불감증 해소
- 다양한 현상을 고려하여 정확한 내진 성능 평가 및 설계를 바탕으로 국민의 안전한 삶 확보
- 선진화된 내진 설계 기술 및 평가 기술을 국가 정부의 지원을 바탕으로 국내에서 자체적으로 개발 및 적용하여 국가 경쟁력 확보가 가능하며, 국내 건설 업체들의 세계적 기술 경쟁력 확보
- 지반 구조물의 지진하중평가 및 설계 기준 선진화 연구를 수행함으로써 국내 지진 공학 연구 기술 및 수준을 세계적 수준으로 도약

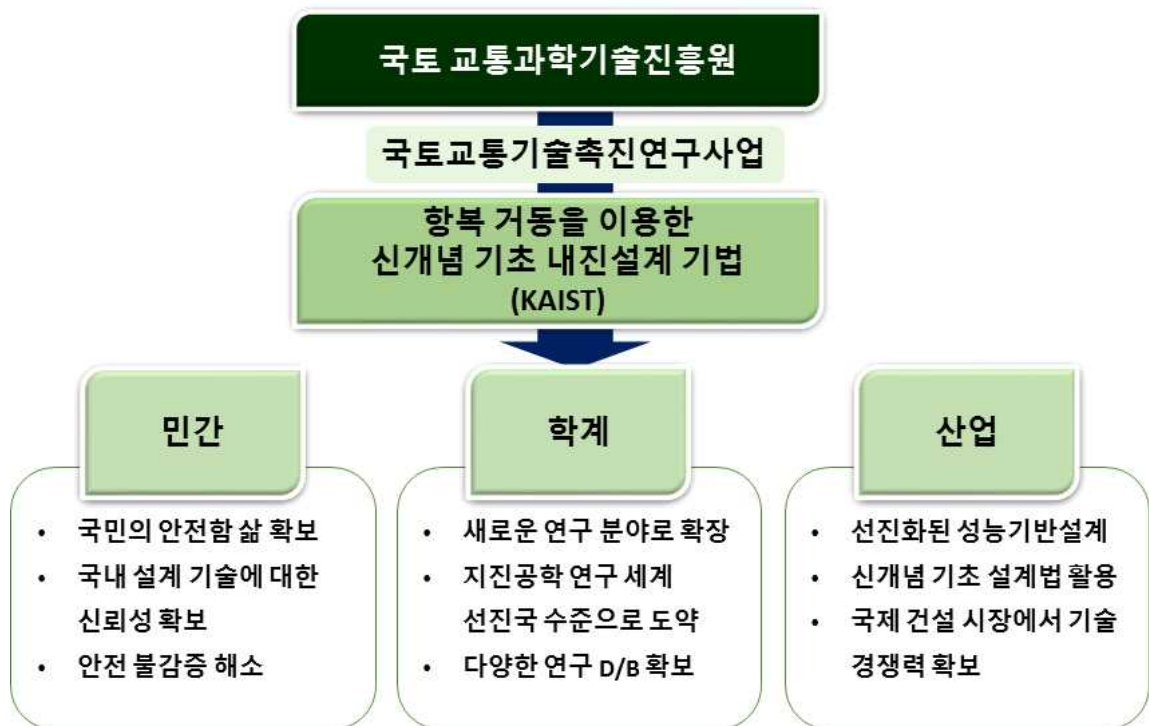


그림 155. 연구개발 성과의 정책적 효과분석

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

1절 연구성과 향후 활용방안

- ◎ 현재 국내 내진설계 기준 선진화 필요성이 국가차원으로 대두되고 있으며, 구조물의 내진 설계 기준을 경제적이고 효과적으로 개선할 수 있음.
- ◎ 현재 국내의 설계기준은 국외 선도그룹에 비해 미비한 실정이며, 유럽의 신뢰성 설계 기준에 대한 국내 적용의 문제점이 대두되고 있어 유관 기관과 건설시공사와의 적극적인 협업을 통하여 국내 실정에 맞는 기술 개발 및 설계기술 발전 도모 가능.
- ◎ 국내·외 대형 토목 구조물 설계·시공에 대한 수요를 고려할 때, 본 연구팀의 연구 성과들이 적극 활용 될 수 있으며, 산업체와의 공동 연구를 통하여 향후 기술 검증 및 효율적인 기술이전을 유도. 향후 국내 건설 시장의 확대 및 국내 기술 세계화 유도
- ◎ 지진 시 경제적이고 안정적인 내진설계 기술을 확보하고 창의적인 설계개념을 도입함으로써 미래지향적 설계기법을 개발하고 현행 내진설계 기준의 문제점을 보완할 수 있음.
- ◎ 본 연구과제에서 수행된 실험 자료는 추후 KOCED 건설연구인프라운영원 사이트에 공개되어 일반 산,학,연 관계자들간의 자료 공유를 통하여 기초연구자료 활용이 기대됨. 건설교통분야 최고 실험시설의 활용 결과를 공유함으로써 실험교육 및 전문인력 양성에 도움이 되며 이를 통하여 국가 R&D 효율을 극대화 할 것으로 기대됨

2절 추가연구 필요성 등

본 연구과제에서는 원심모형실험을 활용하여 기초 항복거동을 이용한 설계법을 개발 및 검증하였다. 비결합 말뚝 기초, 분리된 말굽형 기초 등은 본 연구를 통해서 상부구조물의 지진하중을 줄여주고 기초 침하를 억제하는 안전하고 경제적인 기초 설계법이 될 수 있다. 단, 이러한 설계법을 실무에 적용하기 위해서는 수치해석 및 실험을 통해서 다양한 형태의 기초 시스템에 대한 변수 연구가 필요하다. 또한, 최근 성능기반설계의 대표적 설계법인 변위기반 설계법을 이용하기 위해서는 기초의 거동 뿐 아니라 상부 구조물의 비선형 거동을 함께 고려한 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다. 이에 맞춰 이루어질 수 있는 후속연구의 구체적인 목표 및 방향은 아래와 같다.

1. 항복거동을 이용한 기초 시스템의 유효성 및 안정성 검증 연구

- 본 연구에서는 제한적인 기초 단면에 대해서만 항복거동에 대한 연구가 수행되었으므로 향후 다양한 인자에 대한 영향을 평가할 필요가 있다. 이 때, 실무 전문가들의 의견을 반영하고, 수치해석 및 현장 실험 등 다양한 방법을 이용하여 항복거동을 이용한 기초 설계법의 유효성 및 안전성 검증이 이루어져야 한다.

2. 비결합 말뚝 기초의 실무 적용성 평가

- 현행 설계기준에서는 말뚝 기초의 설계 시, 말뚝기초와 말뚝 캡의 강결을 명시하고 있다. 이는 실무에서 기초의 과다설계를 유발 할 뿐 아니라 비결합 하였을 때보다 시스템의 지진 하중이 크게 발현되어 강진 시 안정성에도 문제가 발생할 우려가 있다. 또한, 일본에서는 말뚝과 말뚝 캡 사이 결합 조건을 결함과 비결합의 중간형태인 부분결합을 사용하는 방법도 대두되고 있는 실정이다. 따라서 추후 국내에서도 기초의 경제조건(결합 형태, 방법 등)에 대한 연구를 통해서 기초 설계 형태를 보다 유연화 시킬 필요가 있다.
- 비결합 말뚝기초가 지진 시 시스템의 지진 하중을 줄여주는 현상이 본 연구를 통해서 확인 되었다. 다만 설계 조건에 따라서 풍하중 등의 수평하중 작용 시 인발에 대한 저항력이 확보되어야 한다. 향후 수평하중에 대한 인발 저항력과 지진 하중을 동시에 줄일 수 있는 기초 형태에 대한 연구가 이루어 질 필요가 있으며, 이를 통해서 선진화된 기초 설계 기술을 보유할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌(보고서 작성시 인용된 모든 참고 문헌을 열거)

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Load and Resistance Factor Design Bridge Design Specifications. 6th Edition. c2012

AASHTO (2002) LRFD Highway Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., Second Edition. ASCE Standard(ASCE/SEI7-05); Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (2005), American Society of Civil Engineers.

Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Loli, M., Apostolou, M. and Gerolymos, N. (2009). "Soil failure can be used for seismic protection of structures." Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 2, pp.309-326.

Anastasopoulos, I., Gelagoti, F., Kourkoulis, R. and Gazetas, G. (2011). "Simplified Constitutive Model for Simulation of Cyclic Response of Shallow Foundations: Validation against Laboratory Tests." J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 137, No. 12, pp.1154-1168.

- Anastasopoulos, I., Kourkoulis, R., Gelagoti, F. and Papadopoulos, E. (2012). “Rocking response of SDOF systems on shallow improved sand: An experimental study.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 40, pp.15–33.
- Anastasopoulos, I., Kontoroupi, T. (2014). Simplified approximate method for analysis of rocking systems accounting for soil inelasticity and foundation uplifting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 56, 28 - 43. doi:10.1016/j.soildyn.2013.10.001
- Belytschko, T. (1983), “An Overview of Semidiscretization and Time Integration Procedures”, in *Computational Methods for Transient Analysis*, Ch. 1, Elsevier Science Publishers, New York, pp.1–65.
- Bouckovalas, G., Chaloulos, Y. (2013). Kinematic interaction of piles in laterally spreading ground. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(3), 1221 - 1237. doi:10.1007/s10518-013-9553-1
- Budhu, M., Al-Karni, A.A. (1993), “Seismic bearing capacity of soils.”, *Geotechnique*, vol.43(1), pp.59–68.
- Deng, L., Kutter, B. B. L. (2012). Characterization of rocking shallow foundations using centrifuge model tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41(5), 1043 - 1060. doi:10.1002/eqe
- FEMA 440 (2004). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Federal Emergency Management Agency: Washington, DC.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency) BSSC (2009) *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 750)*, 2009 Edition, Part 1–Provisions. BSSC, Washington, DC, USA.
- Gajan, S., Hutchinson, T. C., Kutter, B. L., Raychodhury, P., Ugalde, J. A., and Stewart, J. P. (2008), “Numerical Models for Analysis and Performance-Based Design of Shallow Foundations Subjected to Seismic Loading”, PEER Report 2007/04, Pacific Earthquake Engineering Research Center.

- Gajan S, Kutter BL (2008). Capacity, Settlement, and Energy Dissipation of Shallow Footings Subjected to Rocking, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 134(8):1129–1141.
- Gelagoti, F., Kourkoulis, R., Anastasopoulos, I., & Gazetas, G. (2012). Rocking-isolated frame structures: Margins of safety against toppling collapse and simplified design approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 32(1), 87 - 102. doi:10.1016/j.soildyn.2011.08.008
- Gajan, S., Kutter, B., Phalen, J., Hutchinson, T. and Martin, G. (2005). “Centrifuge modeling of load-deformation behavior of rocking shallow foundations.” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, No. 7, pp.773–783.
- Gajan, S., & Kutter, B. L. (2008). “Effect of critical contact area ratio on moment capacity of rocking shallow footings.” *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV* (pp. 1–11). ASCE.
- Gajan, S. and Kutter, B. (2009). “Effects of moment-to-shear ratio on combined cyclic load-displacement behavior of shallow foundations from centrifuge experiments.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 135, No. 8, pp.1044–1055.
- Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972), “Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equation and Curves”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.98, No.7, pp.667–691.
- Housner G.W. (1963). “The behaviour of inverted pendulum structures during earthquake.” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 403.17.
- IBC, ICC. “International Building Code.” International Code Council, Inc.(formerly BOCA, ICBO and SBCCI) (2012)
- Kim, S and Stewart, J. P. (2003), “Kinematic Soil-structure Interaction from Strong Motion Recordings,” *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 4, pp. 323–335.

- Kim, D. K., Park, H. G., Kim, D. S., and Lee, S. H. (2010), "Numerical Simulation of Soil-Structure Interaction in Centrifuge Shaking Table System", Proceedings of Korean Geotechnical Society Fall National Conference, September 10, Gyeonggi, Korea
- Kim, D., Kim, N., Choo, Y. and Cho, G. (2013). "A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea." KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 17, No. 1, pp.77-84.
- Kim, D.K., Lee, S.H., Kim, D.S., Choo, Y.W., & Park, H.G. (2014). Rocking Effect of a Mat Foundation on the Earthquake Response of Structures. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 04014085. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001207
- Kokkali, P., Abdoun, T. and Anastasopoulos, I. (2015). "Centrifuge modeling of rocking foundations on improved soil." J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 141, No. 10, p.04015041.
- Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer, J. (1973), "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol.99, No.5, pp.421-427.
- Kumar, J., Mohan, Rao V.M.K. (2002), "Seismic bearing capacity factors for spread foundations.", vol.125(1), pp.59-68.
- Lee, S. H., Kim, D. S., Choo, Y. W., Park, H. G., and Kim, D. K. (2010), "Dynamic Centrifuge Modelling for Evaluating Seismic Loads of Soil-Foundation-Structures", Proceedings of Korean Geotechnical Society Fall National Conference, September 10, Gyeonggi, Korea
- Lee, S., Choo, Y. and Kim, D. (2013). "Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 44, pp.102-114.
- Lee, J. S., Kim, D. S., Ha, J. G., and Jo, S. B. (2014), "Soil-foundation-structure interaction by an explicit time integration method", Proceedings of 11th World Congress on Computational Mechanics,

July 20–25, Barcelona, Spain

- Liu, W., Hutchinson, T. C. T., Kutter, B. L. B., Hakhamaneshi, M., Aschheim, M., Kunnath, S. S. (2013). Demonstration of compatible yielding between soil–foundation and superstructure components. *Journal of Structural Engineering*, 139(Special issue), 1408 - 1420. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X. 0000637.
- Marti, J., Cundall, P. (1982). Mixed discretization procedure for accurate modelling of plastic collapse. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 6(1), 129–139.
- Meyerhof, G. G. (1951). “The ultimate bearing capacity of foundations.” *Geotechnique* 2, No. 4, pp. 301–332
- Mylonakis, G., Syngros, C., Gazetas, G., Tazoh, T. (2006). “The role of soil in the collapse of 18 piers of Hanshin Expressway in the Kobe earthquake.” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 35, pp.547–575
- Panagiotidou, A., Gazetas, G. and Gerolymos, N. (2012). “Pushover and seismic response of foundations on stiff clay: analysis with P-Delta effects.” *Earthquake Spectra*, Vol. 28, No. 4, pp.1589–1618.
- Paolucci, R., Pecker, A. (1997a), “Soil inertia effects on the bearing capacity of rectangular foundations on cohesive soils.”, *Engineering Structures*, vol.119(8), pp.637–43
- Paolucci, R., Pecker, A. (1997b), “Seismic bearing capacity of shallow strip foundations on dry soils.”, *Soils and Foundations*, vol.119(8), pp.637–43
- Pecker, A. (2006). “Enhanced seismic design of shallow foundations: Example of the Rion Antirion bridge.” 4th Athenian Lecture on Geotechnical Engineering, Hellenic Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Athens, Greece.
- Rayhani, M. H. T. and Naggar, M. H. EI. (2008), “Numerical Modeling of Seismic Response of Rigid Foundation on Soft Soil”, *International Journal of Geomechanics*, ASCE, Vol.8, No.6, pp. 336–346.

- Richards R. Jr., Elms D.G., Bundhu M.(1993), "Seismic bearing capacity and settlements of foundations.", *Journal of Geotechnical Engineering*, vol.119(4), pp.662-74.
- Schofield, A. N. (1980). *Cambridge geotechnical centrifuge operations*. *Geotechnique*, 30(3), 227-268.
- Stewart, J. P., Fenves, G. L., & Seed, R. B. (1999). Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings. I: Analytical Methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(1), 26 - 37. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:1(26)
- Stewart, J. P., Seed, R. B., & Fenves, G. L. (1999). Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings. II: Empirical Findings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(1), 38 - 48. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:1(38)
- Taylor, R. E. (Ed.). (2003). *Geotechnical centrifuge technology*. CRC Press.
- Veletsos AS, Meek JW. Dynamic behavior of building-foundation system (1974), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3: 121-138.
- Wolf, J. P. (1976). "Soil-structure interaction with separation of base mat from soil (lifting-off)." *Nucl. Eng. Des.*, 38(2), 357.384.
- Vesic, A.S. (1973), "Analysis of ultimate loads of shallow foundations.", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.99(1), pp.45-73
- Wood, JH. "Earthquake induced soil pressures on structures," PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1973.
- Yim, S. C. and Chopra, A. K. (1985) "Simplified earthquake analysis of structures with foundation uplift," *Journal of Structural Engineering*, ASCE 111(4), 906.930.
- Zeng, X., & Schofield, A. N. (1996). Design and performance of an equivalent-shear-beam container for earthquake centrifuge modelling.

Geotechnique, 46(1), 83-102.

건설도서 (1999), 도로교의 내진설계계산예(토목구조물 설계계산 예 시리즈), 건설
도서, 서울, pp.5-9.

건축구조기준 (2009), 대한건축학회

구조물기초설계기준(2008). Ministry of Land, Transportation and Maritime
Affairs. Structure Foundation Design Code. Korea Geotechnical Society.
c2008.

도로교설계기준(2008). Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs.
Korean Highway Bridge Design Code. Korean Society of Civil Engineers.
c2010.

고길완, 하정곤, 박헌준, 김동수 (2016). “수평반복하중 실험을 이용한 근입된 얇은
기초의 회전거동 메커니즘 평가” 한국지반공학회 논문집, 제32권, 제8호
하정곤, 조성배, 박헌준, 김동관, 김동수 (2016). “다양한 기초 형식에 따른 단자유
도 구조물 지진하중 평가를 위한 동적 원시모형실험” 한국지진공학회 논문집,
제20권, 제5호

선창국, 정충기, 김동수 (2005), “국내 내륙의 설계 지반 운동 결정을 위한 지반
증폭계수 및 지반분류 체계 제안”, 한국지반공학회 논문집, 제21권, 제6호,
pp.101-115.

윤종구, 김동수, 방은석 (2006), “국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계
응답스펙트럼 개선에 대한 연구 (I) - 국내 내진설계기준의 문제점 분석”, 한
국지진공학회 논문집, 제10권, 제2호, pp.39-50.

조양희, 장승필. (1990). 기초의 부분적 들림이 지반-구조물상호작용 시스템의 지
진응답에 미치는 영향. 대한토목학회논문집, 10(1), 37-45.

추연욱, 이진선, 김동수. (2013). 논문: 비선형 수치해석을 통한 단자유도 얇은 기
초 구조물의 지진 응답특성 검증. 한국지반공학회논문집, 29(3), 29-40.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.